

MEĐIMURSKO VELEUČILIŠTE U ČAKOVCU

Preddiplomski stručni studij Održivi razvoj



ZAVRŠNI RAD

**ELEKTROOTPORNO TOČKASTO
ZAVARIVANJE KOD VALOVITIH STRANICA
DISTRIBUTIVNIH KOTLOVA**

Darinka Krček

Čakovec, 2018.

MEĐIMURSKO VELEUČILIŠTE U ČAKOVCU

Preddiplomski stručni studij Održivi razvoj



ZAVRŠNI RAD

ELEKTROOTPORNO TOČKASTO ZAVARIVANJE KOD VALOVITIH STRANICA DISTRIBUTIVNIH KOTLOVA

Kolegij: Tehnologija I

Darinka Krčec
Matični broj: 0313016946

Mentor: prof. dr. sc. Ivan Samardžić

Čakovec, 2018.

Podaci za bibliografsku karticu

Ime i prezime: Darinka Krčec

Mjesto i datum rođenja: Varaždin, 8. 11. 1996.

Naslov rada: Elektrootporno točkasto zavarivanje kod valovitih stranica distributivnih kotlova

Broj stranica: 35

Broj slika: 23

Broj tablica: 12

Broj priloga: 1

Broj bibliografskih izvora: 18

Ustanova i mjesto gdje je rad izrađen: MEĐIMURSKO VELEUČILIŠTE U ČAKOVCU

Postignut stručni naziv: stručna prvostupnica (*baccalaurea*) održivog razvoja

Mentor: prof. dr. sc. Ivan Samardžić

Oznaka i redni broj rada:

Datum obrane rada:

Povjerenstvo za ocjenu i obranu završnog rada:

Predsjednik povjerenstva:

Mentor: prof. dr. sc. Ivan Samardžić

Član povjerenstva:

I Z J A V A

Izjavljujem da sam završni rad izradila samostalno, koristeći se vlastitim znanjem, literaturom i provedenim eksperimentima.

U radu mi je pomagao savjetima i uputama voditelj završnog rada prof. dr. sc. Ivan Samardžić te mu iskreno zahvaljujem.

Suglasna sam da se moj završni rad objavi u javnoj internetskoj bazi Nacionalne i sveučilišne knjižnice u Zagrebu i u repozitoriju završnih radova Međimurskog veleučilišta u Čakovcu.

Pristupnica:

Darinka Krčec

ELEKTROOTPORNO TOČKASTO ZAVARIVANJE KOD VALOVITIH STRANICA DISTRIBUTIVNIH KOTLOVA

Sažetak

U radu je opisan postupak elektrootpornog točkastog zavarivanja i isti je prikazan kod valovitih stranica distributivnih kotlova. Osnovni materijal je hladno valjani čelik kvalitete DC03 prema standardu EN10130 koji dolazi u balama određene širine (400 do 1600 mm). Uzorci lima su različitih debljina: 1,0 mm, 1,2 mm i 1,5 mm. Proizvodnja valovitih stranica distributivnog kotla vrši se na GEORG TKWA 1600 proizvodnoj liniji. Nakon oblikovanja valovitih stranica dubine veće od 170 mm dolazi otisnuće koje se dobije elektrootpornim točkastim zavarivanjem. U eksperimentalnom dijelu izvršit će se ispitivanje uzoraka s ciljem odabira optimalnog parametra elektrootpornog točkastog zavarivanja za svaku debljinu lima. Elektrootporno točkasto zavarivanje u ovom se slučaju koristi za dobivanje bolje stabilnosti i čvrstoće valovitih stranica.

Ključne riječi: elektrootporno točkasto zavarivanje, valovite stranice, optimalni parametri

RESISTANCE SPOT WELDING WAVY PAGES OF THE DISTRIBUTIVE BOILERS

Summary

The paper describes the procedure of resistance spot welding and the same is shown on the wavy pages of the distribution boilers. The basic material is cold-rolled steel grade DC03 according to standard EN10130 which comes in bales of a certain width (400 to 1600 mm). Patterns of the sheet have different thicknesses: 1.0 mm, 1.2 mm and 1.5 mm. The production of wavy pages of the distribution boilers is done on the GEORG TKWA 1600 production line. After formatting wavy depths deeper than 170 mm, the printing is obtained by resistance spot welding. In the experimental work, samples will be tested to select the optimal electro-spot welding parameter for each individual sheet thickness. Resistance spot welding in this case is used to obtain better stability and strength of the curved sides.

Key words: resistance spot welding, wavy pages, optimal parameters

SADRŽAJ

1.	UVOD	1
2.	ELEKTROOTPORNO TOČKASTO ZAVARIVANJE.....	2
2.1.	Elektrootporno zavarivanje.....	2
2.1.1.	Jouleov zakon	2
2.1.2.	Vrste elektrootpornog zavarivanja	4
2.1.3.	Elektrootporno točkasto zavarivanje i ostali postupci zavarivanja	5
2.2.	Postupak i varijante EO točkastog zavarivanja	7
2.3.	Proces zavarivanja i parametri EO točkastog zavarivanja.....	9
2.3.1.	Sila pritiska elektroda.....	11
2.3.2.	Promjer kontaktnih površina elektroda	12
2.3.3.	Vrijeme prijanjanja elektroda	12
2.3.4.	Vrijeme zavarivanja	13
2.3.5.	Vrijeme zadržavanja sile pritiska	13
2.3.6.	Struja zavarivanja	14
2.4.	Strojna oprema za EO točkasto zavarivanje	15
2.4.1.	Sustav zaštite od ozljeđivanja	17
2.5.	Elektrode za EO točkasto zavarivanje	17
2.5.1.	Oblici vrha elektrode	17
2.5.2.	Materijali elektroda	18
2.5.3.	Hlađenje elektroda.....	19
2.6.	Materijali pogodni za EOT zavarivanje.....	19
2.7.	Prednosti, nedostaci i primjena EO točkastog zavarivanja.....	21
3.	EKSPERIMENTALNI DIO.....	23
3.1.	Materijal ispitnih uzoraka.....	23
3.2.	Opis stroja.....	23
3.2.1.	Opis uređaja.....	24

3.2.2.	Upravljačka jedinica uređaja	26
3.3.	Tijek eksperimenta	29
3.3.1.	Ispitni uzorci.....	29
3.3.2.	Određivanje parametara zavarivanja	29
3.3.3.	Parametar struje zavarivanja za svaki uzorak	30
3.3.4.	Izgled zavarenih uzoraka.....	31
3.4.	Vizualna analiza uzoraka.....	32
4.	ZAKLJUČAK	35
5.	LITERATURA.....	36
6.	PRILOZI.....	38

Popis oznaka i kratica

Veličina, oznaka ili kratica	Jedinica	Značenje
I	A	Struja zavarivanja
Q	J	Količina topline
R	Ω	Ukupni električni otpor
t	S	Vrijeme zavarivanja
R ₁ , R ₂	Ω	Otpori radnih komada
R _{1-E}	Ω	Otpor materijala i gornje elektrode
R _{2-E}	Ω	Otpor materijala i donje elektrode
R _{k12}	Ω	Kontaktni otpor radnih komada
EO	-	Elektrootporno
EOT	-	Elektrootporno točkasto
S	mm ²	Plošni presjek vodiča
l	mm	Duljina električnog vodiča
ρ	$\Omega\text{mm}^2/\text{m}$	Specifični električni otpor
DM	-	Dodatni materijal
F	N	Sila pritiska elektroda
t _z	s	Vrijeme zavarivanja
t _p	s	Vrijeme prianjanja elektroda
t _d	s	Vrijeme zadržavanja sile pritiska
d _e	mm	Promjer kontaktne površine elektroda
I _z	A	Struja zavarivanja
d _t	mm	Promjer zavarenog spoja
t	mm	Debljina radnog komada
n ₁	-	Broj namotaja na primaru
n ₂	-	Broj namotaja na sekundaru
U ₁	V	Napon primara
U ₂	V	Napon sekundara
ZUT	-	Zona utjecajne topline

1. UVOD

Znanost o materijalima i metalurgiji, termodinamika i utjecaj temperature, elektrotehnika, kemija (metalurški i drugi procesi) i informatika osnovni su skup znanstvenih disciplina koje je potrebno poznavati za dobro razumijevanje koncepta zavarivanja. Postupak zavarivanja podrazumijeva spajanje dvaju ili više užarenih metalnih dijelova, istorodnih ili raznorodnih materijala tako da se dobije homogeno zavaren spoj. Kvalitetan zavaren spoj bez grešaka može se dobiti taljenjem ili pritiskom, s ili bez korištenja dodatnog materijala, optimalnom kombinacijom topline, pritiska i vremena. Zavarljivost može biti: dobra u slučaju zavarivanja bez posebnih predradnji i mjera opreza; slaba kada su potrebne određene predradnje i mjere opreza (npr. predgrijavanje) te jako slaba zavarljivost u slučaju nemogućnosti izvedbe ekonomski prihvatljivog zavora. Za dobru zavarljivost potrebno je ostvariti zadovoljavajuću žilavost osnovnog materijala i nakon zavarivanja.

Tablica 1 prikazuje dvije velike skupine načina spajanja metala i njihove podvrste. Zavarivanje materijala u rastaljenom stanju na mjestu spoja, uz dodatni materijal ili bez njega spada u zavarivanje taljenjem, npr. plinsko, elektrolučno zavarivanje. S druge strane, zavarivanje pritiskom vrši se u čvrstom ili omekšanom stanju na mjestu spoja, a spoj se dobiva pritiskom ili udarcem bez potrebe za dodatnim materijalom (npr. kovačko, elektrootporno zavarivanje) [1].

Tablica 1. Podjela prema načinu zavarivanja i njihove potpodjele [2]

ZAVARIVANJE TALJENJEM	ZAVARIVANJE PRITISKOM
Plinsko	Kovačko
Aluminotermijsko	Difuzijsko
Elektro pod troskom	Plinsko
Elektronskim mlazom	Hladno
Ljevačko	Elektrootporno
Laserom	Eksplzijom
Plazmom	Ultrazvukom
Elektrolučno	Trenjem
	...

U metalnoj industriji drugo mjesto, po postotku korištenja, zauzela je tehnologija elektrootpornog zavarivanja, nakon postupka elektrolučnog zavarivanja. Ovim se postupkom zavaruje oko 30 % svih zavarenih spojeva. Elektrootporno zavarivanje najviše se koristi u automobilske i zrakoplovne industrije, a na njezinu važnost ukazuje činjenica da jedan automobil sadrži do 10 000 zavora, dok u jednom zrakoplovu postoji čak do milijun elektrootporno zavarenih točaka [3].

2. ELEKTROOTPORNO TOČKASTO ZAVARIVANJE

Najčešće korišten i jedan od najstarijih električnih postupaka zavarivanja je elektrootporno točkasto zavarivanje. Zavareni spoj nastaje kombinacijom triju čimbenika: topline, pritiska i vremena. Vrijednosti spomenutih čimbenika ovise o činiteljima kao što su vrsta materijala, stanje površine, debljina materijala zavarivanja. Za dobivanje kvalitetnog zavara potrebno je optimalno rasporediti sve tehnološke parametre procesa [4].

2.1. Elektrootporno zavarivanje

Elektrootporno zavarivanje obuhvaća grupu postupaka kod kojih se zavareni spoj dobiva zagrijavanjem i taljenjem osnovnog materijala toplinom stvorenom pomoću velikog električnog otpora na mjestu dodirivanja materijala te dodatnom silom dobivenom pritiskom elektroda. Električni otpor stvara toplinu za zagrijavanje materijala na temperaturu zavarivanja, kao i za zagrijavanje okolne zone materijala za postizanje lakše plastične deformacije [5, 6]. Koristi se izmjenična struja jakosti 100 – 300 000 A, niskog napona (0,5 – 25 V), relativno kratkog protjecanja struje kroz materijal zavarivanja (50 ms do nekoliko desetaka sekundi) zbog sigurnosti kod rukovanja strojevima za elektrootporno zavarivanje. Moguće opasnosti kod EO zavarivanja su prskanje kapljica i proizvodnja topline za vrijeme zavarivanja [3].

2.1.1. Jouleov zakon

Toplina nastaje u vremenu prolaska električne energije kroz vodič, a količina dobivene topline određena je prema Jouleovom zakonu:

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t \text{ [J]} \quad (2.1).$$

Pritom, I označava jakost struje zavarivanja, R električni otpor zavarenih dijelova (ukupni omski otpor) i t trajanje zavarivanja (prolazak električne energije). Ukupni omski otpor dobiva se pribrajanjem pojedinih otpora: $R = R_{1-E} + R_1 + R_{k12} + R_2 + R_{2-E}$;

sa značenjem:

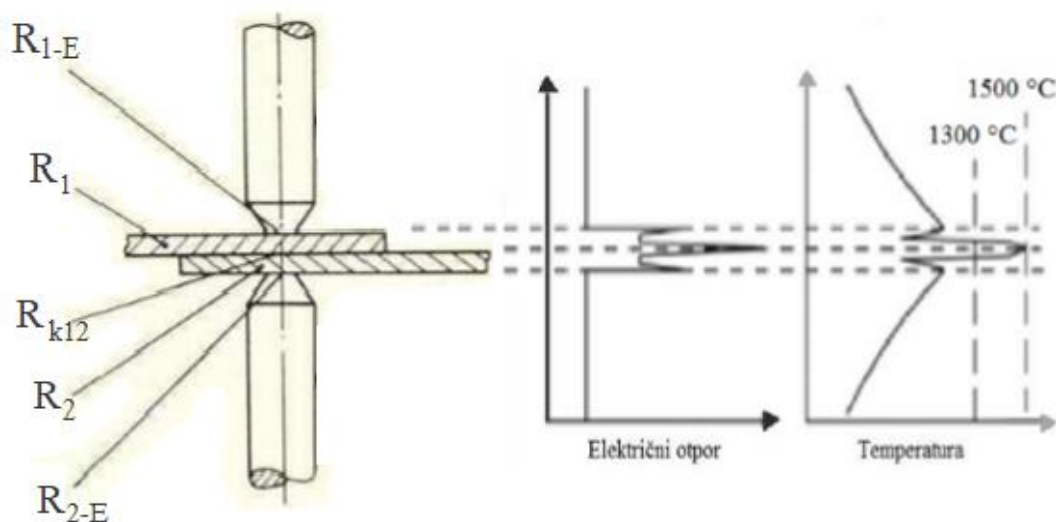
R_1 i R_2 – otpori radnih komada

R_{1-E} – otpor materijala i gornje elektrode

R_{2-E} – otpor materijala i donje elektrode

R_{k12} – kontaktni otpor radnih komada.

Slikom 1 prikazan je temelj elektrootpornog zavarivanja električnim otporima i odnos pozicija u ovisnosti s temperaturom. Električna struja (I) velike jakosti prolazi kroz elektrode koje pritišću radni komad određenom silom u vrlo kratkom vremenu (t) i s malim sekundarnim naponom. Djelovanjem otpora radnog komada i elemenata sekundarnog strujnog kruga razvija se toplina koja stvara zavareni spoj [3].



Slika 1. Prikaz električnih otpora kod EO točkastog zavarivanja u ovisnosti o temperaturi [7]

Najveći otpor ostvaruje se na početku zavarivanja između radnih komada i on se naziva kontaktni otpor R_{k12} . Veliki kontaktni otpor nastaje zbog početne nehomogenosti i hrapavosti dodirnih površina, kao i zbog kontakta koji se ostvaruje na mjestu dodira radnih materijala te kroz koji teče struja kroz samo mali dio presjeka. Značajno smanjenje kontaktnog otpora ostvaruje se istovremenim djelovanjem odgovarajućom silom pritiska. Kontaktni se otpor također smanjuje kako temperatura raste, zbog rasta specifičnog otpora sloja materijala uz kontaktno mjesto, smanjenja otpora oksidnog sloja te povećanja površine fizičkih kontakata između elektroda i plastične deformacije zagrijanog materijala [5].

Otpori kod kontakta materijala i elektrode (R_{1-E} i R_{2-E}) zadržavaju konstantne vrijednosti za vrijeme zavarivanja. Ovi su otpori mnogo manji od kontaktnog otpora R_{k12} s obzirom na to da elektrode koje vrše pritisak na radni materijal imaju dobru električnu vodljivost.

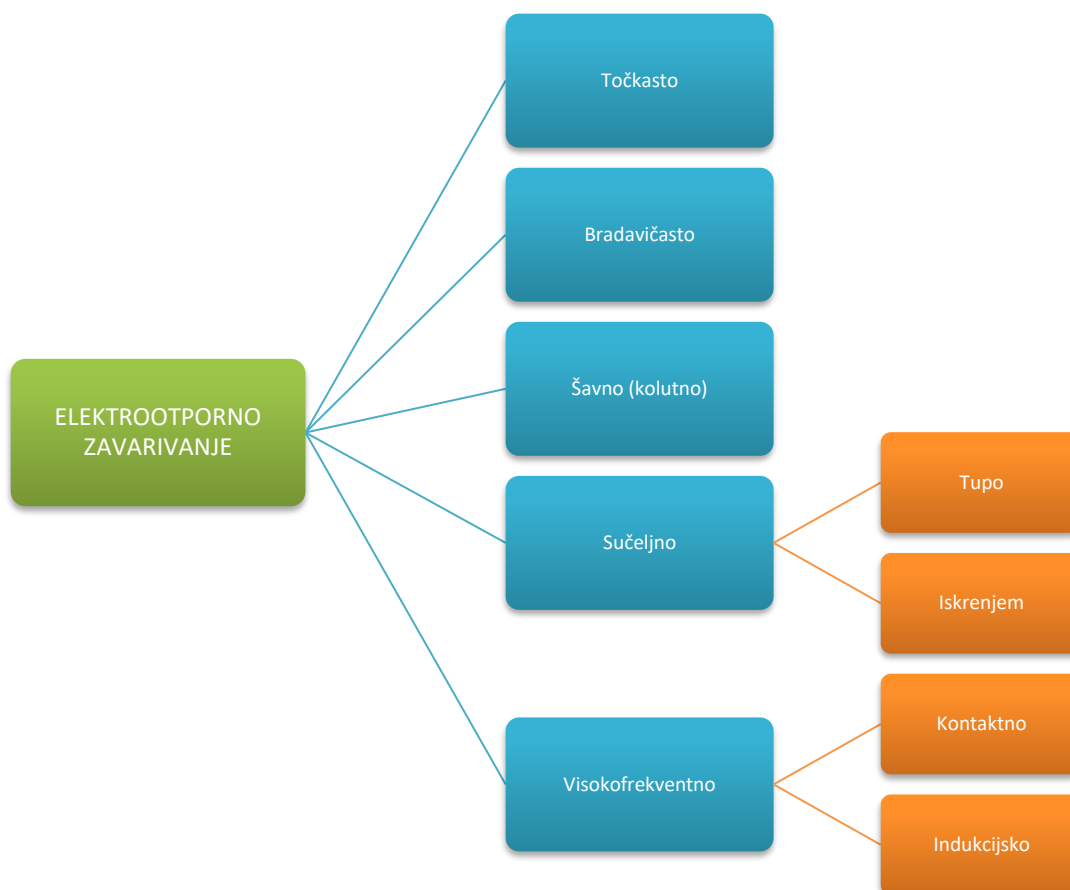
Otpori radnih komada R_1 i R_2 određuju se Ohmovim zakonom koji je poznat za električni otpor:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} [\Omega] \quad (2.2).$$

Oznaka l predstavlja duljinu električnog vodiča u smjeru električne struje (mm), ploština njegovog poprečnog presjeka označena je sa S (mm²), dok je ρ oznaka za specifični električni otpor, odnosno električnu otpornost materijala koja je proporcionalna promjeni temperature. Električna otpornost ujedno je i najvažnija termo-fizička karakteristika materijala elektrootpornog zavarivanja jer omogućuje da se izvor topline, koja je u početnoj fazi najviše površinska, promijeni u zapreminsku [5, 8].

2.1.2. Vrste elektrootpornog zavarivanja

Elektrootporno zavarivanje sadrži nekoliko podskupina postupaka zavarivanja. Podjela postupaka je vidljiva na Slici 2. U nastavku ovog rada detaljnije će se obraditi EO postupak točkastog zavarivanja.



Slika 2. Podjela elektrootpornog zavarivanja [9]

2.1.3. Elektrootporno točkasto zavarivanje i ostali postupci zavarivanja

Uspoređujući EO zavarivanje s ostalim vrstama zavarivanja, EO točkasto zavarivanje namijenjeno je za spajanje vrlo tankih materijala (Tablica 2) od 0,25 do 3 mm. Također je vidljivo da je ova vrsta zavarivanja među jednim vrstama za spajanje ovako tankih materijala, uz postupak zavarivanja mikroplazmom. Tablica prikazuje primjenu određenog postupka zavarivanja s obzirom na debljinu materijala.

Tablica 2. Orijentacijska primjena postupaka zavarivanja ovisno o debljini materijala [2]

Postupak zavarivanja	Debljina materijala, mm
Ultrazvučno	do 1
Mikroplazma	0,25 – 2
Laser, 2 kW	do 3
Elektrootporno točkasto i šavno	0,25 – 3
Plazmom	0,5 – 8
Plinsko ($C_2H_2 + O_2$)	0,5 – 4 (4 – 8)
Laserom (do 20 kW)	0,15 – 15
MIG (kratki luk)	0,5 – 4 (4 – 15)
MIG (normalni luk)	2 – 8 (8 – 50)
Elektronskim mlazom (do 5 kW)	do 30
Elektronskim mlazom (do 25 kW)	1 do 75
Elektronskim mlazom (do 72 kW)	5 do 300
TIG	do 4 (4 – 10)
MAG	do 3 (3 – 50)
REL	2 – 5 (5 – 150)
EPT	25 – 450
EP	2 – 25 (25 – 300)
Aluminotermijsko	> 10

Sljedećom tablicom (Tablica 3) dana je usporedba osamnaest postupaka zavarivanja prema cijenama uređaja za pojedini postupak, stupnju mehanizacije te potrebi dodatnog materijala. Za sva elektrootporna zavarivanja nije potreban dodatni materijal što ima utjecaj na relativno niski indeks cijene uređaja, osobito za točkasto, šavno, sučeljeno i bradavičasto EO zavarivanje.

Tablica 3. Relativni pokazatelj cijena, stupnja mehanizacije i dodatnog materijala nekih od postupaka zavarivanja [2]

Postupak zavarivanja	Oznaka postupka	Indeks cijene uređaja	Stupanj mehanizacije R - ručni PA - poluautomatski A - automatski	Dodatni materijal (DM)
Ručno elektrolučno	REL	1	R	elektroda
Elektrolučno taljivom elektrodom u zaštiti aktivnog plina	MAG	1,5 – 5	PA, A	zaštitni plin (Ar ili He) + žica (DM)
Elektrolučno pod zaštitnim praškom	EP	10	PA, A	zaštitni prašak + žica
Elektrootporno pod troskom	EPT	> 20	A	troska + žica
Elektrolučno netaljivom elektrodom u zaštiti inertnog plina	TIG	> 2	A	zaštitni plin (Ar ili He) s ili bez žice (DM)
Elektrolučno netaljivom elektrodom (impulsno) u zaštiti inertnog plina	TIG	6 – 10	A	zaštitni plin (Ar ili He) s ili bez žice (DM)
Elektrolučno taljivom elektrodom u zaštiti inertnog plina	MIG	1,5 – 5	PA, A	zaštitni plin (Ar ili He) + žica (DM)
Elektrootporno točkasto	EOT	1,5 – 15	R, A	bez DM
Elektrootporno šavno	EOS	0,5 – 10	R, A	bez DM
Elektrootporno sučeljno	EOS	0,5 – 10	PA, A	bez DM
Elektrootporno bradavičasto	EOB	1,5 – 15	PA, A	bez DM
Elektrootporno iskrenjem	EOI	4 – 50	PA, A	bez DM
Elektrootporno tupo	EOT	4 – 50	PA, A	bez DM
Plinsko zavarivanje	PZ	> 0,2	R, A	gorivi plin i kisik bez ili sa žicom (DM)
Aluminotermijsko	ATZ	> 0,2	R, A	termit (Al_2O_3 + Fe_3O_4)
Mikroplazma	MPZ	> 2	R, A	plazmeni plin bez žice (DM)
Elektronskim mlazom (snopom)	EMZ	18 537	A	bez DM
Difuzijsko	DZ	> 10	A	bez DM

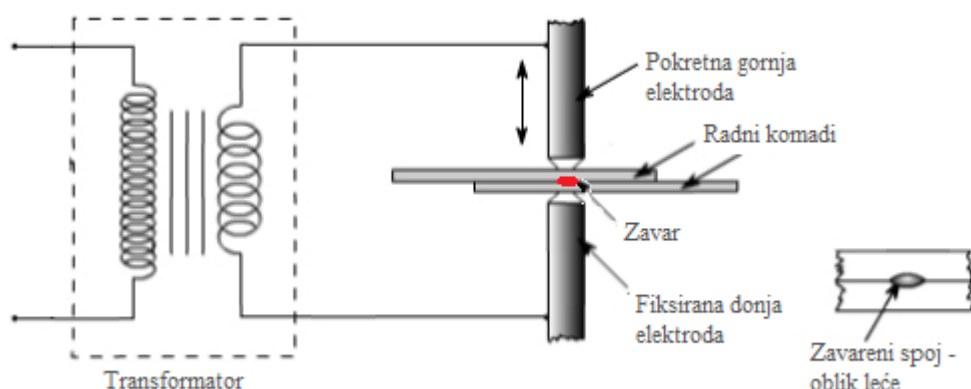
Sljedeća usporedba prikazana je između postupaka EO zavarivanja u Tablici 4, uspoređujući njihove načine izvođenja i zagrijavanja kod zavarivanja. Točkasto zavarivanje ima veliku prednost nad ostalim vrstama EO zavarivanja, s čak tri moguća načina izvođenja.

Tablica 4. Postupci elektrootpornog zavarivanja [9]

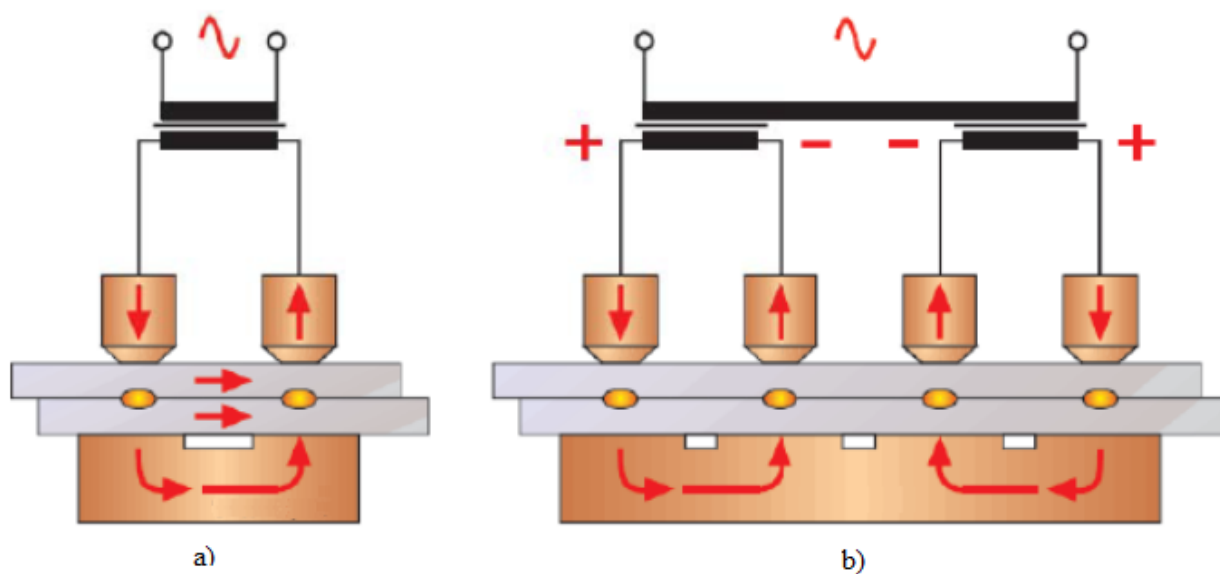
Vrsta spoja	Postupak zavarivanja	Način izvođenja	Način zagrijavanja
Preklopni	Točkasto	Pomoću jednog para elektroda	Na principu električnog otpora
		Pomoću više para elektroda	
		Pomoću kolutova	
	Šavno (kolutno)	S dva koluta; s jednim kolutom i ramom	
	Bradavičasto	Na stroju za bradavičasto zavarivanje	
Sučeljeni	Sučeljeno zavarivanje čistim otporom	Na stroju za bradavičasto zavarivanje	Na principu električnog otpora
	Sučeljeno zavarivanje iskrenjem		Iskrenjem

2.2. Postupak i varijante EO točkastog zavarivanja

Postupak EO točkastog zavarivanja spada u preklopno zavarivanje koje se dobiva umekšanjem ili taljenjem dvaju materijala između dviju elektroda koje su dobro stegnute i kroz koje se dovodi električna energija. Ovaj klasičan način točkastog zavarivanja primjer je direktnog točkastog zavarivanja (Slika 3). Zavar se, kod direktnog i indirektnog zavarivanja, dobiva na osnovi električnog otpora koji uzrokuje Jouleovu toplinu (2.1.1.) na dodirnim mjestima dvaju materijala. Toplina pritom tali materijal, rastaljeni dio se izmiješa te tako nastaje zavar točkastog oblika s presjekom oblika leće [10]. Kod indirektnog točkastog zavarivanja položaj elektroda nije jedna nasuprot druge (direktno zavarivanje), nego jedna pored druge, a radni se komad nalazi ispod elektroda na bakrenoj površini. Ova se vrsta točkastog zavarivanja koristi kada je teško ili nemoguće radni komad direktno stisnuti s obje strane. Prikazano je indirektno točkasto EO zavarivanje s jednim parom (Slika 4a) i s više parova elektroda (Slika 4b) koje su spojene na zajednički električni izvor.

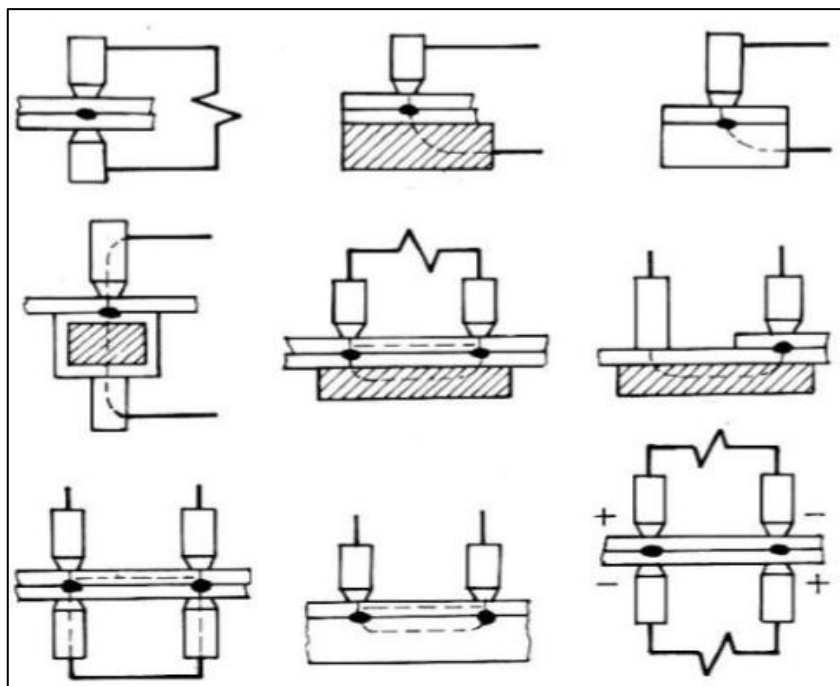


Slika 3. Shematski prikaz direktnog EO točkastog zavarivanja [11]



Slika 4. Primjer indirektnog EO točkastog zavarivanja s jednim parom i s više parova elektroda [12]

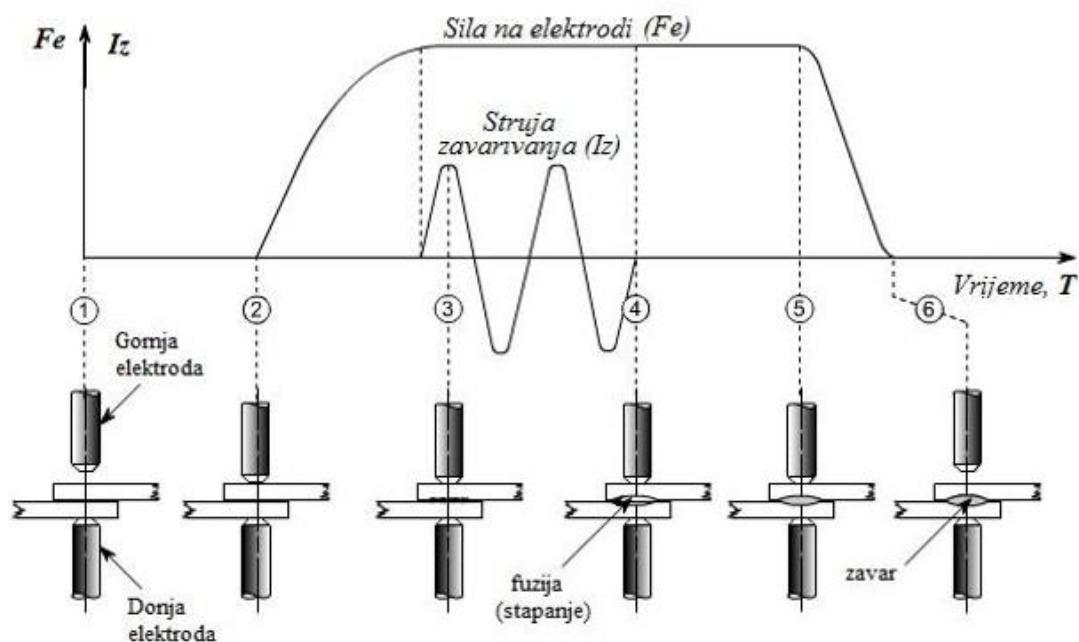
Zavareni spoj EO točkastog zavarivanja nije kontinuiran, nego ga čini jedna ili više točaka, dok zavarivanje može biti višetočkasto ili jednotočkasto. Najčešći oblik točkastog zavarivanja je jednotočkasto dvostrano zavarivanje, a još nekoliko načina izvođenja točkastog zavarivanja prikazano je na Slici 5. Problem koji se može pojaviti pri EO točkastom zavarivanju je skretanje (šentiranje) struje kao posljedica okolnih zavarenih točaka. Ova je pojava izraženija kod jednostranog točkastog zavarivanja.



Slika 5. Shematski prikaz nekoliko načina izvođenja točkastog zavarivanja [9]

2.3. Proces zavarivanja i parametri EO točkastog zavarivanja

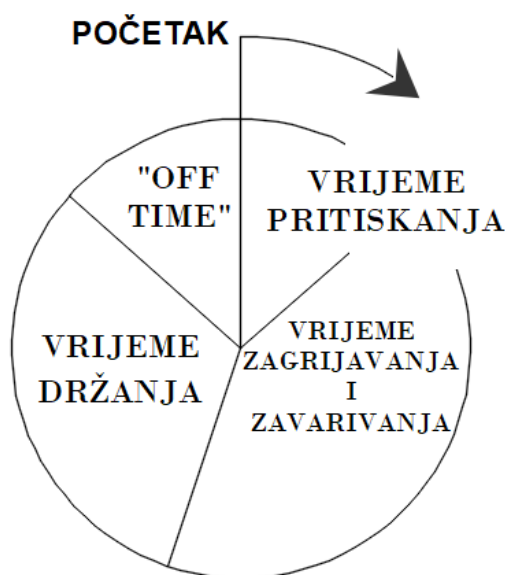
Postupak ostvarivanja EO točkastog zavarenog spoja složen je proces s gledišta metalurgije i termodinamike. Potrebno je procijeniti uvjete pod kojima nastaje spoj optimalne kvalitete, tj. drugim riječima, potrebno je dobro uskladiti odnos promjenjivih veličina (parametara) točkastog zavarivanja. Cijeli ciklus zavarivanja prikazan je na Slici 6.



Slika 6. Ciklus EO točkastog zavarivanja [7]

Ciklus započinje pokretanjem gornje elektrode (točka 1) i dodirivanjem radnih komada koji leže na nepomičnoj donjoj elektrodi iz potrebe za učvršćivanjem radnih komada između elektroda (točka 2). Radni komadi se održavaju pod pritiskom pri čemu se propušta struja visoke jakosti kroz elektrode (točka 3) u unaprijed određenom vremenu. Temperatura površine kontakta brzo se zagrijava na potrebnu temperaturu zavarivanja, s obzirom na da je na tom mjestu prisutan najveći otpor u cijelom strujnom krugu. Tlakom između elektroda i stezanjem vrućeg (rastaljenog) materijala dovršava se zavarivanje (točka 4). Oblikovani zavareni spoj hladi se pod pritiskom elektroda (točka 5) [11].

Većina točkastih zavarivanja ostvaruje se u vrlo kratkim intervalima. Vrijeme zavarivanja se mjeri i usklađuje po liniji napona, kao i sve vremenske funkcije zavarivanja. Na Slici 7 prikazana su četiri karakteristična vremenska perioda pri elektrootpornom zavarivanju koji čine jedan vremenski ciklus zavarivanja.



Slika 7. Četiri karakteristična vremenska perioda u jednom ciklusu točkastog zavarivanja [7]

Off Time je vrijeme u kojem su elektrode razdvojene radi premještanja materijala za sljedeću točku zavarivanja. Ostali vremenski periodi ciklusa su opširnije opisani u nastavku rada.

Točno određivanje parametara EO točkastog zavarivanja od velike je važnosti jer će i najmanja promjena pojedinog parametra utjecati na vrijednosti svih ostalih parametara zavarivanja, kao i na kvalitetu zavarenog spoja. Uz osjetljivost promjena parametara i činjenicu postepenog povećanja kontaktne površine elektrode za vrijeme zavarivanja, određivanje optimalnih parametara zavarivanja vrlo je težak i složen zadatak. Odgovarajućom kombinacijom parametara postiže se jak i kvalitetan zavareni spoj [9, 13].

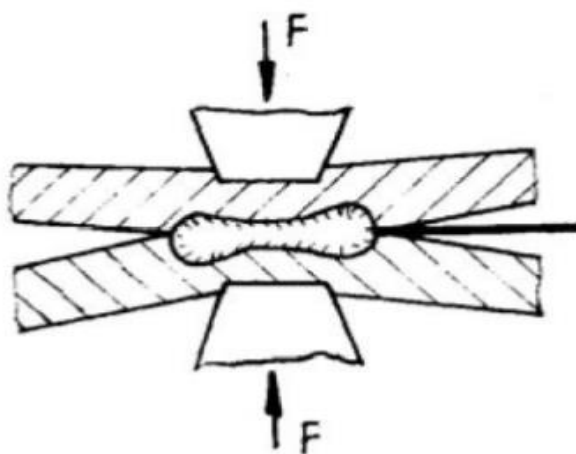
Najveći utjecaj na stvaranje kvalitetnog zavarenog spoja imaju ovi parametri:

- 1) sila pritiska elektroda, F [N]
- 2) promjer kontaktne površine elektroda, d_e [mm]
- 3) vrijeme prijanjanja elektroda, t_p [s]
- 4) vrijeme zavarivanja, t_z [s]
- 5) vrijeme zadržavanja sile pritiska, t_d [s]
- 6) struja zavarivanja, I_z [A].

2.3.1. Sila pritiska elektroda

Potrebno je pažljivo promotriti utjecaj sile pritiska elektroda kod zavarivanja. Namjena ovog parametra je spajanje radnih komada, prvenstveno za držanje istih kako bi se osigurao intimni kontakt površina radnih komada. Ovaj postupak osigurava električnu otpornost i provodljivost električne energije na mjestu zavarivanja [4]. Pogodna sila pritiska s ostvarenim kontaktom vrhova elektroda s površinom radnog komada stvara toplinu, ne samo na mjestu zavarivanja, nego i šire. Sila pritiska ne smije biti prevelika kako ne bi prouzrokovala određene probleme. Treba imati na umu da povećanjem sile pritiska dolazi do smanjenja toplinske energije i u tom je slučaju potrebno povećati i struju zavarivanja I_z . Ako će struja zavarivanja biti prevelika, može doći do prskanja između radnog komada i elektroda, što uzrokuje lijepljenje elektrode za radni materijal.

S druge strane, ako je sila pritiska premala, a jakost struje prevelika, moguća je nepoželjna pojava tzv. istiskivanje (Slika 8). Istiskivanje se može pojaviti na početku procesa zavarivanja kao posljedica brzog zagrijavanja i nedovoljne sile pritiska ili na kraju procesa zbog prekomjernog zagrijavanja [7].



Slika 8. Prikaz pojave istiskivanja zavarenog spoja

Aдекватна vrijednost sile pritiska elektroda iznosi oko 90 N/mm². Ipak, uvijek je prisutan problem povećanja veličine kontaktne površine tijekom zavarivanja. Za zadržavanje jednakih uvjeta za vrijeme procesa zavarivanja, sila pritiska morala bi se postepeno povećavati [14].

2.3.2. Promjer kontaktnih površina elektroda

Svrha kontaktnih površina ili vrhova elektroda je dovođenje struje zavarivanja na radni komad, postavljanje žarišne točke zavarenog spoja te odvođenje topline s površine radnog komada. Vrhovi elektroda za vrijeme zavarivanja moraju zadržati svoj prvobitan oblik i svojstva toplinske i električne provodljivosti. Isto tako, vrhovi elektroda kontroliraju veličinu zavarenog spoja te je stoga važno da promjer kontaktne površine elektrode bude nešto veći od potrebnog promjera zavara. Kada bi promjer vrha elektrode bio premalen, površina zavarenog spoja bila bi još manja i vrlo slaba. Također, u slučaju kada je promjer vrha elektrode veći od potrebnog, postoji opasnost od pregrijavanja materijala te stvaranja praznina i plinskih džepova u zavarenom spoju [11].

Svojstva različitih materijala utječu na odabir veličine vrha elektrode zbog čega je razvijena opća formula za pravilan odabir promjera vrha elektrode. Prema formuli se izračunava promjer točke d_t zavarivanja, a t je oznaka za debljinu radnog materijala koji se zavaruje:

$$d_t = 5 \cdot t^{\frac{1}{2}} [mm] \quad (2.3).$$

Tako će se u slučaju točkastog zavarivanja dvaju komada debljine 1 milimetra proizvesti zavareni spoj promjera 5 mm. Za stvaranje zavara te veličine potrebna je elektroda promjera 6 mm kontaktne površine, odnosno vrha. U praksi, elektroda promjera 6 mm površinskog kontakta koristi se za materijale debljine od 0,5 do 1,25 mm [14].

2.3.3. Vrijeme prijanjanja elektroda

Vrijeme prijanjanja elektroda predstavlja zatvaranje elektroda, odnosno vremenski interval između početka pritiska elektroda na radni komad i početka propuštanja struje kroz isti. Svrha ovog parametra je postizanje potrebne sile pritiska elektroda za zavarivanje na radni komad prije početka zavarivanja.

2.3.4. Vrijeme zavarivanja

Vrijeme zavarivanja je vrijeme u kojem električna energija prolazi kroz elektrode i radni komad. Za dobivanje kvalitetnog zavarenog spoja potrebna je velika kontrola nad istim. Ovo je ujedno parametar u kojem je teško odrediti optimalnu vrijednost jer ovisi o više čimbenika, kao i o željenoj izvedbi zavarenog spoja, na primjer:

- potrebno je što kraće vrijeme zavarivanja
- odabrani parametri moraju osigurati minimalno trošenje elektroda (vrijeme zavarivanja će biti kratko)
- dulje vrijeme zavarivanja daje veći promjer zavarenog spoja
- u slučaju kada oprema za zavarivanje ne osigurava potrebne parametre, struju zavarivanja ili silu pritiska elektroda, tek se tada postavlja odgovarajuće vrijeme zavarivanja [14].

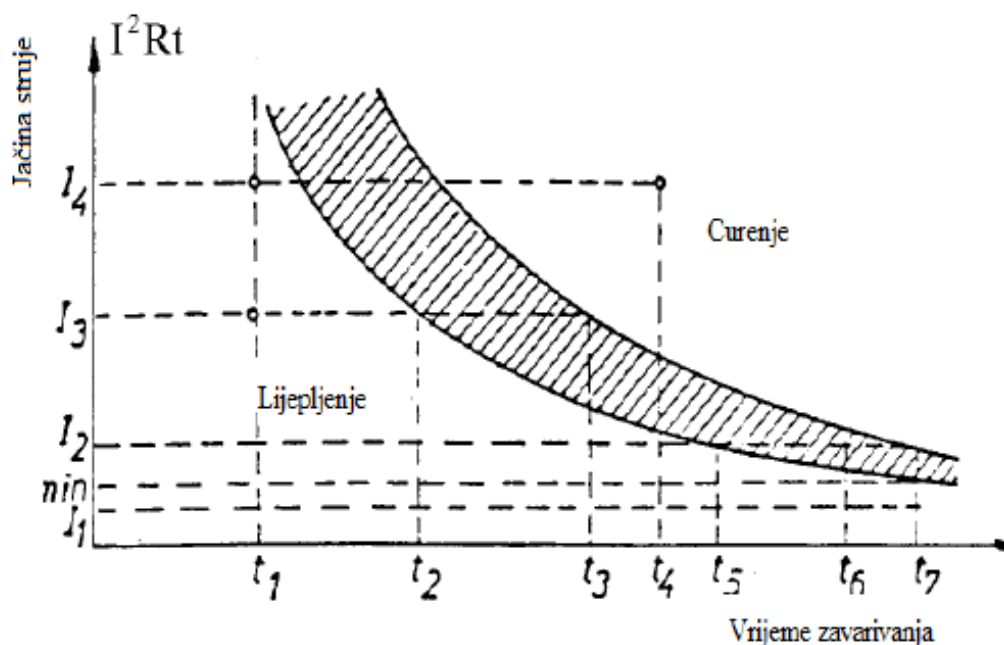
Ako je vrijeme zavarivanja predugo, mjesto zavarivanja može preći točku taljenja (čak i vrelišta) materijala te može uzrokovati neispravan zavareni spoj zbog nastajanja poroznosti plina. Postoji i mogućnost izbacivanja rastaljenog metala iz zavarenog spoja, što može smanjiti poprečni presjek istog i oslabiti zavar. Kraće vrijeme zavarivanja smanjuje mogućnost pretjeranog prijenosa topline u radnom komadu, promjena oblika zavarenog spoja je minimizirana, a zona zahvaćena toplinom oko zavarenog mjesta je znatno manja [4]. Optimalno vrijeme zavarivanja nalazi se u rasponu od 0,1 do 0,63 sekundi, ovisno o debljini radnog komada, sili pritiska elektroda i promjeru vrhova elektroda [7].

2.3.5. Vrijeme zadržavanja sile pritiska

Vrijeme zadržavanja sile pritiska je vrijeme između završetka prolaska električne energije kroz radni komad i otvaranja elektroda. Nakon procesa zavarivanja (protjecanja struje) elektrode ostaju zatvorene i zadržavaju pritisak na radnom komadu s ciljem hlađenja zavarenog spoja. S tehničkog gledišta, ovo je najzanimljiviji parametar zavarivanja. Zadržavanje sile je potrebno za očvršćivanje jezgre (ispunjavanje šupljina i pora) zavarenog spoja prije otpuštanja pritiska. Vrijeme zadržavanja sile pritiska ne smije biti predugo kako ne bi došlo do zagrijavanja elektroda, a time i do nepotrebnog izlaganja bržem trošenju. Nadalje, ako je vrijeme zadržavanja sile predugo, a sadržaj ugljika u materijalu visok (više od 0,1 %), postoji opasnost od nastajanja krhkog zavora. U slučaju zavarivanja galvaniziranih ugljičnih čelika uzima se duže vrijeme zadržavanja sile pritiska [13].

2.3.6. Struja zavarivanja

Struja zavarivanja je struja koja prolazi strujnim krugom za vrijeme stvaranja zavarenog spoja. To je parametar koji ima najveći utjecaj na količinu proizvedene topline i koji je usko povezan s vremenom zavarivanja. Odnos između struje i vremena zavarivanja određen je izrazom za količinu dobivene topline, tj. Joulovim zakonom iz Poglavlja 2.1.1. i Formulom 2.1. S obzirom na to da je teško odrediti optimalnu vrijednost struje zavarivanja, može se uzeti minimalna jakost struje koja ostvaruje zavareni spoj u skladu s vremenom zavarivanja. Minimalna vrijednost struje zavarivanja ovisi o svojstvu materijala, debljini radnog komada i stanju njegovih radnih površina, dimenziji vrhova elektroda, sili pritiska i temperaturi materijala na mjestu kontaktnih površina [5]. Dijagram ovisnosti jakosti struje i vremena zavarivanja prikazan je na Slici 9. Vrijednosti vremena zavarivanja i jakosti struje pri kojima se može generirati zavareni spoj prikazane su šrafiranim područjem.



Slika 9. Ovisnost struje i vremena zavarivanja

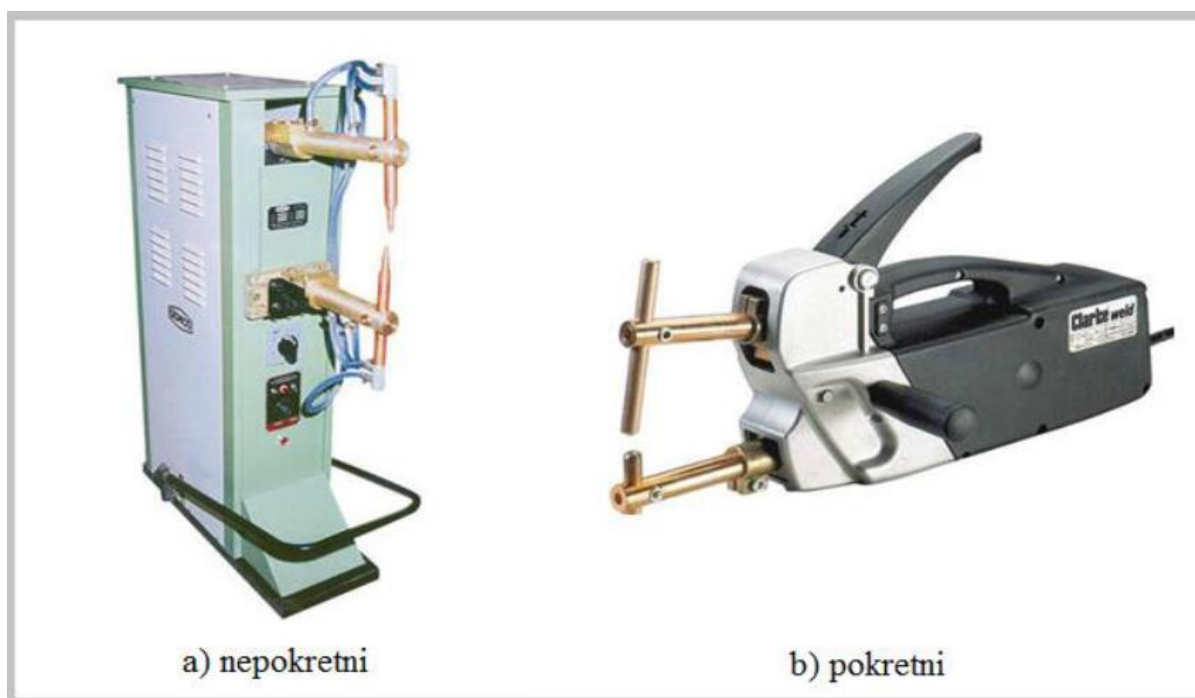
Ako se odaberu vrijednosti struje i vremena zavarivanja koje padaju lijevo od šrafiranog područja, moguća je pojava „lijepljenja“ zavarenog spoja, dok s druge strane, desno od šrafiranog područja, može doći do takozvanog „curenja“, tj. prskanja rastopljenog materijala zbog prezagrijavanja. Ove pojave djeluju negativno na kvalitetu zavarenog spoja. Metoda koja se koristi za točno određivanje vrijednosti potrebne jakosti struje zavarivanja je postupno povećanje iste do trenutka uočavanja taljenja radnih komada. Vrijednost jakosti struje u trenutku početka taljenja materijala uzima se kao potrebna jakost struje zavarivanja [9].

2.4. Strojna oprema za EO točkasto zavarivanje

Strojevi za EO točkasto zavarivanje uključuju gotovo 70 posto sveukupne primjene strojeva za elektrootporno zavarivanje. Ovisno o zahtjevima i potrebama EO točkastog zavarivanja strojevi se razlikuju prema:

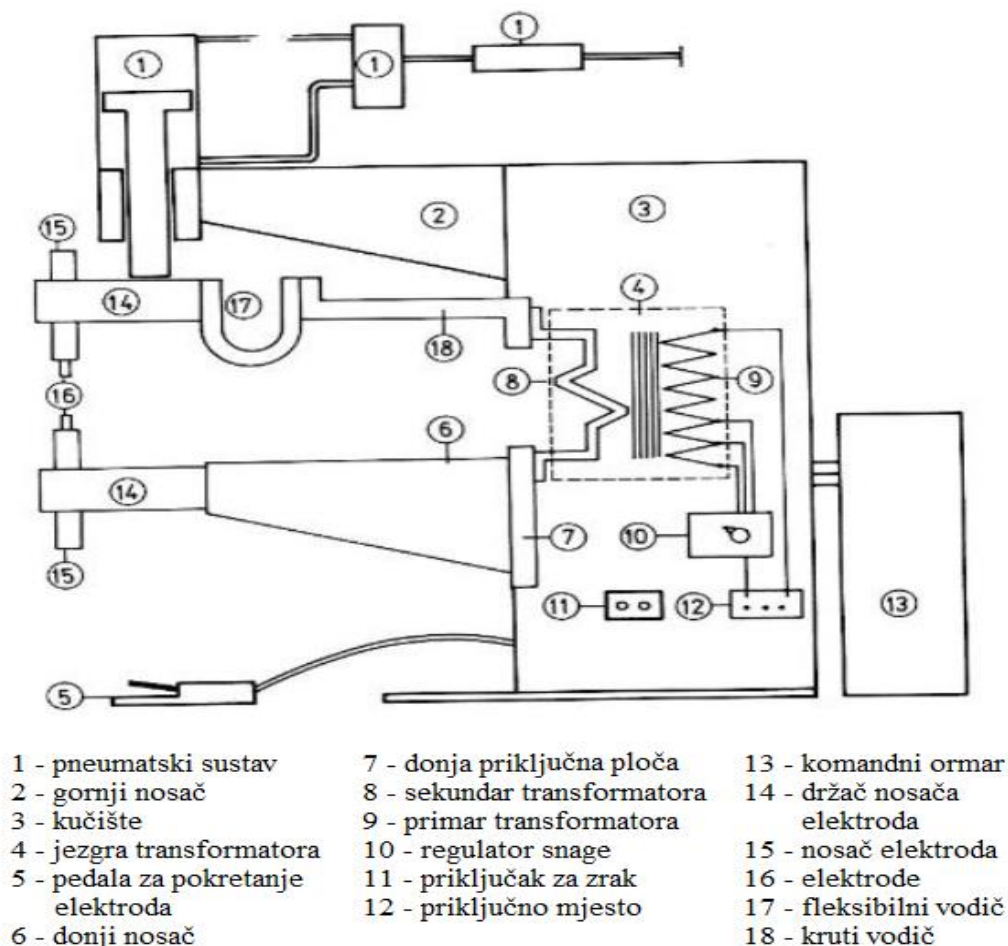
- vrsti struje za zavarivanje
- broju spojeva koje mogu istovremeno zavariti
- načinu ostvarivanja sile pritiska
- putanji elektrode
- načinu izvedbe izvora struje.

Prosječne nominalne snage ovih strojeva iznose oko 16 kA, a razmak između nosača elektroda kod nepokretnih strojeva kreće se oko 500 mm. Struja zavarivanja se regulira, isključuje i uključuje pomoću tiristora. Sila pritiska može se ostvariti na dva načina: mehanički (nogom ili rukom) i automatski (hidraulično, električno ili pneumatski). Prema smjeru putanje elektroda postoje lučni (elektrode pri kretanju opisuju luk) i pritiski (kretanje elektrode je vertikalno) strojevi. U današnjoj industriji češća je primjena strojeva s lučnom putanjom elektroda za EO točkasto zavarivanje. Prema izvedbi izvora struje prisutni su nepokretni i pokretni strojevi. Svaki tip stroja ima određene prednosti i nedostatke. Nepokretni stroj može ostvariti veću silu pritiska elektroda, dok pokretni stroj ostvaruje veću mobilnost, tj. mogućnost zavarivanja na bilo kojem mjestu gdje je prisutna električna energija [7, 9].



Slika 10. Prikaz strojeva za točkasto zavarivanje prema izvoru struje [7]

Za postizanje točkastog zavarenog spoja prema određenim uvjetima i parametrima (Poglavlje 2.3.) strojevi moraju imati električni sustav (energetski i upravljački dio), mehanički sustav i elektronski programator koji služi za kontrolu i programiranje parametara zavarivanja. Na Slici 11 shematski je prikaz nepomičnog stroja za točkasto zavarivanje s oznakama njegovih dijelova.



Slika 11. Shematski prikaz nepomičnog stroja za EO točkasto zavarivanje s označenim elementima [9]

Električni sustav stroja sastavljen je od izvora električne energije (transformatora), upravljačkog uređaja (tirisora), sklopova za uključivanje i isključivanje mrežnog napona te električnih vodova koji dovode struju do radnog komada. Uloga transformatora je izmjena struje mreže u struju potrebnu za zavarivanje, odnosno za smanjenje napona mreže s 380 V ili 220 V na napon povoljan za zavarivanje koji iznosi od 0,5 V do 10 V. Sekundar transformatora ostvaruje struju niskog napona i velike jakosti (do nekoliko kA) pomoću jednog do dva namota. S obzirom na to da transformator radi neprekidno s velikim strujama, stvaraju se velika toplinska opterećenja zbog čega je potrebno osigurati kvalitetno hlađenje istog [9].

Izlazni napon određen je promjenom broja namotaja na sekundaru transformatora. Vrijednost sekundarnog napona ovisi o mrežnoj struji, odnosno o naponu primara prema odnosu:

$$n_1:n_2 = U_1:U_2 \quad (2.4),$$

pri čemu je:

n_1 - broj namota na primaru

n_2 - broj namota na sekundaru

U_1 - napon primara

U_2 - napon sekundara.

2.4.1. Sustav zaštite od ozljeđivanja

Današnji uređaji za EO točkasto zavarivanje sadrže senzore za sprečavanje mogućih ozljeda operatera u procesu zavarivanja. Senzori funkcioniraju na način detektiranja mjesta između elektroda. Ako se između elektroda nalazi metal, elektrode će normalno pritisnuti velikom silom i ostvariti zavar. No, ako senzori detektiraju nemetal između elektroda (npr. dlan, prst), onda šalju signal računalnoj jedinici za trenutno obustavljanje pritiska elektroda i tako sprečavaju moguće ozljede. Ovakvi sustavi su vrlo ekonomični, ali i važni zbog povećanja sigurnosti na radu [7, 15].

2.5. Elektrode za EO točkasto zavarivanje

Jednako važan element stroja za EO točkasto zavarivanje su elektrode koje imaju više funkcija. Služe za provođenje struje zavarivanja, za ostvarivanje sile pritiska na radnim komadima prije i za vrijeme zavarivanja, za odvođenje toplinske energije iz zone zavarivanja za vrijeme prolaska struje zavarivanja, ali i nakon zavarivanja, reguliraju struju na mjestu zavarivanja i određuju promjer zavarenog spoja, služe za učvršćivanje i određivanje položaja radnih komada. Životni vijek elektrode ovisi o konstrukciji, materijalu izrade, uvjetima hlađenja i o režimu zavarivanja.

2.5.1. Oblici vrha elektrode

Konstrukcija vrha elektrode utječe na oblikovanje i na izgled zavarene točke. Vrh elektrode može biti različitog oblika, a izbor ovisi o problemu koji se rješava. Elektrode se izrađuju u raznim veličinama i oblicima, a specijalni su oblici namijenjeni za specijalne slučajeve.

Međutim, izdvajaju se tri najvažnija oblika elektroda s vrhom krnjeg stošca (konične elektrode), kupole (zaobljene elektrode) i s ravnim vrhom. Tri osnovna oblika vrha elektroda prikazani su na Slici 12.



Slika 12. Shematski prikaz osnovnih oblika elektroda [9]

Kut konusa konične elektrode iznosi od 120° do 140° , a one se koriste za zavarivanje niskougljičnih, ugljičnih i nehrđajućih čelika, te za lijevano i kovano željezo. Konične elektrode lakše se održavaju i imaju mogućnost dopiranja do teže dostupnih mjesta.

Kupolaste elektrode se koriste kod većih opterećenja i temperatura bez pojava oštećenja. Radijus kupole ove elektrode kreće se od 50 mm do 100 mm, a promjer zavarene točke je manji od površinskog otiska elektrode. Zaobljenim elektrodama se najčešće zavaruju neferitni metali (aluminij, titan, cink).

Elektrode ravnog vrha koriste se u slučaju potrebe minimalnog otiska zavarenog spoja. Kod korištenja ravnih elektroda potrebno je veću pažnju usmjeriti na vrh elektrode da bi bio paralelan s površinom radnog komada.

2.5.2. Materijali elektroda

Materijal elektrode i materijal radnog komada mora sadržavati različitu toplinsku i električnu vodljivost. Također, materijali kojima se izrađuju elektrode posjeduju sljedeće karakteristike:

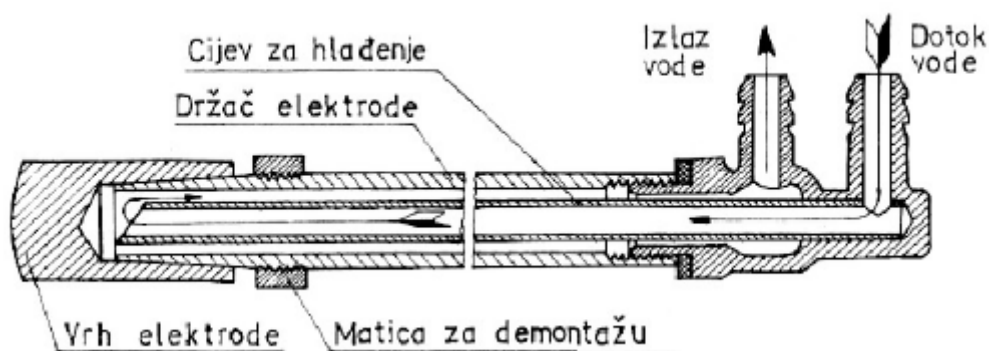
- visoka električna i toplinska vodljivost
- visoka tvrdoća pri radnoj temperaturi
- visoka mehanička otpornost
- homogenost strukture
- postojana mehanička i električna svojstva [12].

Da bi se zadovoljili svi navedeni zahtjevi, elektrode se izrađuju od legura bakra, a RWMA¹ ih je podijelio u nekoliko kategorija:

- Grupa A - bakar s minimalnim dodavanjem drugih slitina; podjela u dva razreda:
 - Razred 1: 99 % bakar + 1 % kadmij, čijom se kombinacijom dobiva 92 % provodljivosti
 - Razred 2: 99,2 % bakar + 0,8 % krom, daju provodljivost od 82 %
- Grupa B - sadrži vatrostalne metale koji imaju visoke točke tališta (molibden, tantal, volfram i renij)
- Grupa C - sastoji se od posebnih materijala, npr. ojačane disperzije bakra [7, 16].

2.5.3. Hlađenje elektroda

Za smanjenje radne temperature elektrode i povećanje životnog vijeka, elektrode se izrađuju s kanalom za hlađenje kojim cirkulira hladna voda. Slikom 13 shematski su prikazani osnovni dijelovi cilindrične zaobljene elektrode za EO točkasto zavarivanje.



Slika 13. Shematski prikaz cilindrične zaobljene elektrode [9]

2.6. Materijali pogodni za EOT zavarivanje

Različiti materijali imaju različite utjecaje na veličinu kontaktnih otpora kod zavarivanja ovisno o mehaničkim svojstvima, električnoj i toplinskoj vodljivosti. Otpornost kontakata ovisit će o poprečnom presjeku vodiča, vrsti materijala koji se zavaruje, njegovim svojstvima i stanju površine radnog komada. Kontaktni otpor određuje proizvodnju topline i metalurške reakcije na sučelju elektrode. Teorijska istraživanja i praktična iskustva dokazala su da na zavarljivost metala i legura za EOT zavarivanje utječe veliki broj čimbenika. Višegodišnja istraživanja omogućuju određivanje ocjena zavarljivosti metala i legura koje su prikazane Tablicom 5.

¹ RWMA - eng. Resistance Welding Manufacturers Association.

Tablica 5. Ocjene međusobne zavarljivosti metala i legura EOT zavarivanjem [9]

1 - odlično 2 - dobro 3 - podnošljivo 4 - loše 5 - nedovoljno 6 - nemoguće	Aluminij	Nehrđajući čelik	Mjed	Bakar	Pocinčani lim	Čelik	Olovo	Nikal	Krom-nikal (20 : 80)	Cink	Fosforna bronca	Novo srebro
Aluminij	2	5	4	5	3	4	5	4	4	3	3	6
Nehrđajući čelik	5	1	5	5	2	1	6	3	3	6	4	4
Mjed	4	5	3	4	4	4	6	3	3	5	3	3
Bakar	5	5	4	5	5	5	5	4	4	5	3	3
Pocinčani lim	3	2	4	5	2	2	4	3	3	3	4	5
Čelik	4	1	4	5	2	1	6	3	3	6	3	4
Olovo	5	6	6	5	4	6	3	5	5	3	5	5
Nikal	4	3	3	4	3	3	5	1	2	6	3	2
Krom-nikal (20 : 80)	4	3	3	4	3	3	5	2	1	6	4	2
Cink	3	6	5	5	3	6	3	6	6	3	4	6
Fosforna bronca	3	4	3	3	4	3	5	3	4	4	2	2
Novo srebro	6	4	3	3	5	4	5	2	2	6	2	1

Zavarljivost čelika za EO zavarivanje podrazumijeva zavarivanje ugljičnih čelika s vrlo niskim postotkom ugljika (0,05 % – 0,10 %), a svojstva zavara gotovo su jednaka svojstvu radnog komada. Povećanjem sadržaja ugljika, iznad 0,10 %, zapaža se beznačajan utjecaj zakaljene strukture zavara pri čemu se povećava i čvrstoća istog te je time moguće postići zavareni spoj čvrstoće veće od čvrstoće materijala koji se zavaruje. Utjecaj zakaljene strukture raste eksponencijalno s povećanjem sadržaja ugljika u čeliku, ali se istovremeno smanjuje plastičnost zavarenog spoja. Zavarivanjem čelika koji sadrži ugljik više od 0,35 % metalografskim ispitivanjem dokazuje se prisustvo martenzita u jezgri zavara što uzrokuje pojavu krtosti, a moguć je nastanak neupotrebljivog spoja ako se zavarena točka toplinski naknadno ne obradi.

Nemagnetični manganski čelici s 12 – 14 % mangana u sebi, uz nizak postotak ugljika, su nemagnetični i vrlo otporni na trošenje. Zavaruju se bez posebnih poteškoća, no potrebna je 20 % veća sila pritiska elektroda nego kod običnih niskougljičnih čelika.

U industriji su za EOT zavarivanje najrašireniji titan i njegove legure. Titan odlikuju niska električna i toplinska vodljivost te je time pogodniji za EOT zavarivanje od aluminijevih legura, kao i mnogih niskougljičnih čelika. Za dobivanje kvalitetnog zavara kod titana nužna je dobra kontrola osnovnih parametara zavarivanja. Vrijeme zavarivanja je najutjecajniji parametar za čvrstoću i strukturnu veličinu ZUT-a kod elektrootpornog točkastog zavarivanja titana i njegovih legura. Količina topline, koja se proizvodi u radnim komadima, proporcionalno se povećava s vremenom prolaska struje, a u slučaju proizvodnje prevelike topline dolazi do smanjenja čvrstoće, pa čak i do razdvajanja limova.

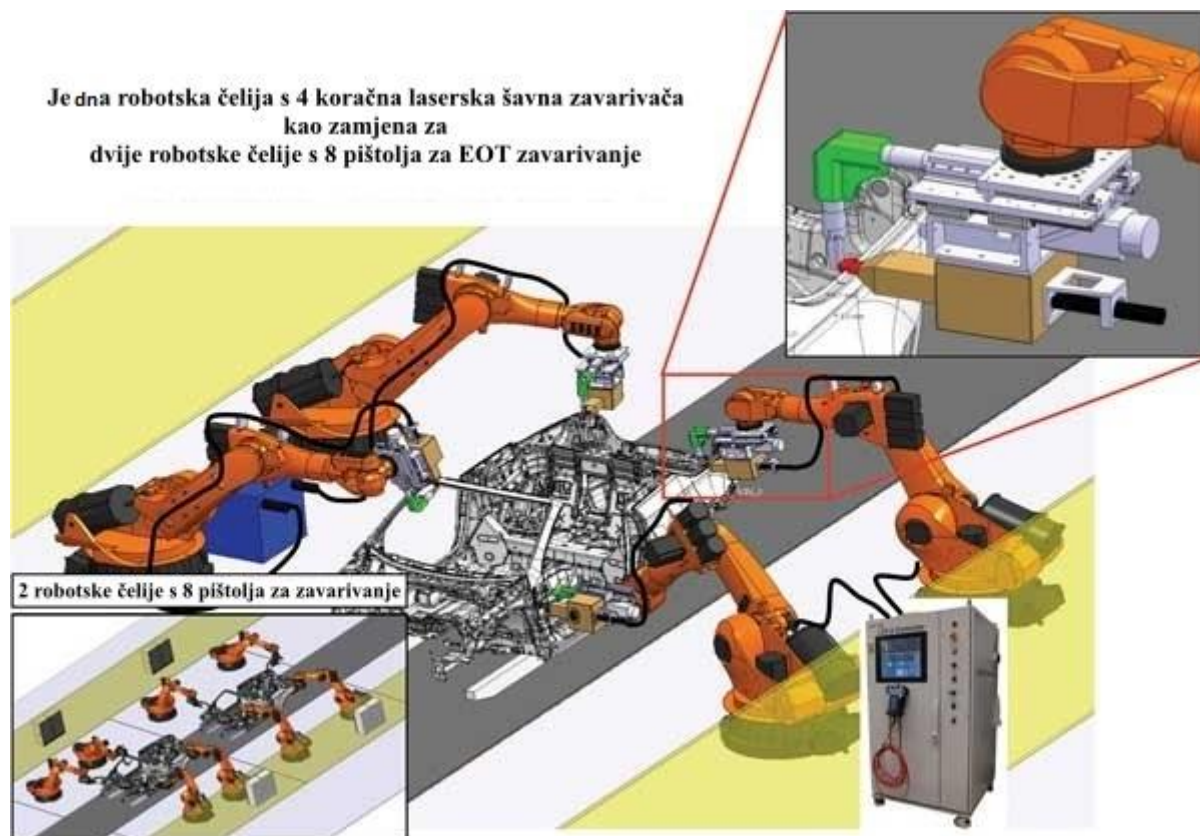
Moguće je EOT zavarivanje aluminija i većine njegovih legura, no s obzirom na to da se radi o materijalu specifičnih svojstava i da legure aluminija ovise o mnogim čimbenicima (osobito o toplinskoj i električnoj vodljivosti, temperaturi taljenja) postupak zavarivanja potrebno je detaljnije razmotriti. Od mnogih aluminijevih legura koje se koriste najčešće su „duraluminij“ (Al-Cu), platinirane aluminijeve legure, aluminij-mangan legura (Al-Mn), aluminij-magnezij legura (Al-Mg) i to u obliku širokog lima i trake.

Osim spomenutih materijala, za EO točkasto zavarivanje koriste se berilijeva bronca (za izradu kućišta manometra, dijafragmi i membrana, tanjurastih opruga, spiralnih opruga i sl.), elektrolitski bakar (zavarivanje šipka i žica), nikal i legure od nikla [9].

2.7. Prednosti, nedostaci i primjena EO točkastog zavarivanja

Vrlo važnu i široku primjenu zauzelo je elektrootporno točkasto zavarivanje zbog svoje brzine zavarivanja, jednostavnosti, učinkovitosti i pogodnosti za mehanizacijom, automatizacijom i robotizacijom. Princip rada s uređajima za EO točkasto zavarivanje lako se uči, obuka nije dugotrajna te nema potrebe za dodatnim obukama. Metalurgija ovog procesa je vrlo jednostavna, ne zahtijeva dodatni materijal, ni zaštitne plinove. EO točkasto zavarivanje poznato je i po visokoj sigurnosti rada s obzirom na to da se koristi struja niskog napona. Ekološki je prihvatljiv postupak zbog čistoće tehnologije i mogućnosti jednostavnog recikliranja.

EOT je prisutan u različitim granama industrije, a najviše gdje je potrebno zavariti veći broj spojeva i gdje je potreba za masovnom i serijskom proizvodnjom. Svoj potpuni razvoj i najveću zastupljenost ima u automobilskoj industriji. U jednom automobilu može se nalaziti do 15 000 elektrootpornih zavarenih spojeva. Strojevi za elektrootporno zavarivanje u većim tvornicama dosežu snagu do 160 000 kVA, brzina zavarivanja im je oko 200 točaka u minuti, a najbrži postižu po 350 točaka u minuti. U automobilskoj industriji EOT je visoko automatiziran i robotiziran (Slika 14) u svrhu povećanja proizvodnosti i bolje kvalitete zavarenih spojeva.



Slika 14. Automatizirano EO točkasto zavarivanje u automobilskoj industriji

Elektrootporno zavarivanje također se koristi u vojnoj industriji za izradu sanduka za municiju, pješačkih mina, raznih stabilizatora, a često i za oružja (za automatske pištolje, mitraljeze, puškomitraljeze). Značajnu ulogu EOT zavarivanje ima u zrakoplovnoj industriji. Elektrootpornim točkastim zavarivanjem u zrakoplovnoj industriji osigurava se manja težina konstrukcije zrakoplova, povećana krutost sklopova, manja opasnost od korozije, veća ekonomičnost i produktivnost. Elektrootporno točkasto zavarivanje primjenjuje se u industriji tračnih vozila, u građevini, u proizvodnji različitih metalnih proizvoda (kotlova, spremnika, cijevi), ali i u prehrambenoj industriji, industriji bijele tehnike, nuklearnoj i svemirskoj tehnici.

Neki od nedostataka elektrootpornog zavarivanja su visoka početna investicija, skupo održavanje opreme i potreba za kvalificiranom radnom snagom za održavanje. Kontrola zavarenog spoja moguća je samo postupkom odvajanja ili razaranja zavarenog spoja. Elektrootpornim točkastim zavarivanjem ostvaruje se niska vlačna čvrstoća spoja, uzrokuje se trošenje elektroda, zavarivanje je moguće samo do određene debljine lima (najčešće do 6 mm), a materijali poput bakra i srebra vrlo teško se zavaruju zbog visoke toplinske vodljivosti.

3. EKSPERIMENTALNI DIO

U praktičnom dijelu rada opisana je tehnologija i postupak elektrootpornog točkastog zavarivanja na hladno valjanom čeliku te je utvrđen plan pokusa za uspoređivanje utjecaja struje zavarivanja (različite jakosti) na različitim debljinama materijala te utjecaj iste na zavareni spoj i njegov oblik. Cijeli eksperimentalni dio završnog rada omogućila je tvrtka Ferokotao d. d., a tamo je i izrađen sam eksperimentalni dio.

3.1. Materijal ispitnih uzoraka

Materijal ispitnih uzoraka je hladno valjani čelik kvalitete DC03 prema normi EN 10130. U pokusu su korištene tri različite debljine 1,0 mm, 1,2 mm i 1,5 mm, a epruvete su narezane u obliku kvadrata dimenzije stranica 980 mm. Kemijski sastav materijala zahtijevan prema standardu DC03 prikazan je Tablicom 6. Analizom je utvrđen kemijski sastav materijala za svaku pojedinu debljinu lima (Tablica 7).

Tablica 6. Kemijski sastav prema zahtjevima norme DC03

Kemijski sastav		C	Mn	Si	S	P	Al	Ti
Standardni zahtjev min.	DC03 Am						0,020	
Standardni zahtjev maks.	DC03 Am	0,10	0,45	0,030	0,035	0,035		0,008

Tablica 7. Kemijski sastav za svaku debljinu lima

Kemijski sastav	C	Si	Mn	P	S	Al
Lim debljine 1,0	0,0498	0,0154	0,2591	0,0101	0,0124	0,0397
Lim debljine 1,2	0,0428	0,0062	0,2168	0,0123	0,0146	0,0426
Lim debljine 1,5	0,0240	0,0130	0,2100	0,0130	0,0040	0,0390

3.2. Opis stroja

Eksperiment je izvršen s pokretnim strojem za elektrootporno zavarivanje talijanskog proizvođača LORS/TECNA®, model 3301 (Slika 15). Pištolj 3301 je za elektrootporno zavarivanje visoke kompaktnosti i modularnosti, postavljen na jednostavnu posebnu funkciju kao i svaki drugi model ovakve vrste.

3.2.1. Opis uređaja

Središnji dio pištolja obavlja cijeli dio snage istog, uključujući i transformator za zavarivanje, SCR kontaktor i zaštitu od pregrijavanja. Stražnji dio stroja uključuje dijelove za upravljanje zrakom: cilindar dvostrukog djelovanja koji omogućuje vrlo visoku radnu brzinu magnetnog ventila velike brzine, ručno upravljanje razvodne kutije s kontrolnom jedinicom koja upravlja dodatnim hodom i dugim radnim hodom, regulator protoka zraka za podešavanje zatvaranja ruku elektroda i brzine njihovog otvaranja. Držači elektroda stroja su vodom hlađeni zajedno sa zglobovima za dovod i povrat vode.



Slika 15. Pokretni stroj za elektrootporno zavarivanje kojim je izveden eksperiment

TECNA pištolj 3301 je, kao i brojna druga oprema za elektrootporno zavarivanje, namijenjen za monofazni priključak na električnu mrežu 240 V, odnosno 50 Hz i istosmjernu struju zavarivanja. Najveća snaga zavarivanja ovog pištolja iznosi 33,2 kVA, dok je najveća struja zavarivanja 11,5 kA.

S obzirom na to da se ovaj pištolj koristi za različite namjene zavarivanja u tvrtki i za različite debljine radnih materijala, zračna linija podliježe jakim promjenama tlaka te je stoga napajanje pištolja spojeno na spremnik 50 – 100 litara koji sadrži mjerač tlaka i kontrolni ventil. Ovaj pištolj za elektrootporno točkasto zavarivanje isporučen je zajedno s jedinicom za podmazivanje filtera s automatskim ispuštanjem vlage. Iako su ovakvi pištolji konstruirani za rad bez podmazivanja, dopušteno je umjereno podmazivanje ako ono ne donosi nikakve nepravilnosti. U takvom je slučaju potrebna dodatna briga za normalno funkcioniranje pražnjenja vlage i manometra. Za dovod rashladne tekućine instaliran je poseban ormarić (Slika 16). Za pravilno hlađenje pištolja temperatura vode mora biti niža od 30 °C.



Slika 16. Ormarić za dovod rashladne tekućine do pištolja

TECNA proizvodi više veličina ruku za elektrode ovog modela pištolja. U ponudi su ruke od 650 mm, 800 mm i 1030 mm. Za ovaj eksperiment korištena je ruka od 650 mm kod koje sila elektrode za 1 bar postiže 16 daN (160 N).

Elektrootporno točkasto zavarivanje se u ovom pokusu izvršilo koničnom elektrodom srednje tvrdoće od legure bakra, kroma i cirkonija. Za određivanje promjera vrha elektrode postoje razni standardi, kao i razni autori koji daju različite empirijske obrasce, a na kraju imaju približne rezultate. U priručniku za korištenje pištolja za elektrootporno točkasto zavarivanje dana je i tablica (Tablica 8) u kojoj je već proračunati promjer elektrode ovisno o debljini radnog materijala. U ovom se eksperimentu zbog jednostavnosti za sve tri debljine lima koristio promjer elektrode od 6 mm.

Tablica 8. Promjeri elektroda za određene debljine lima

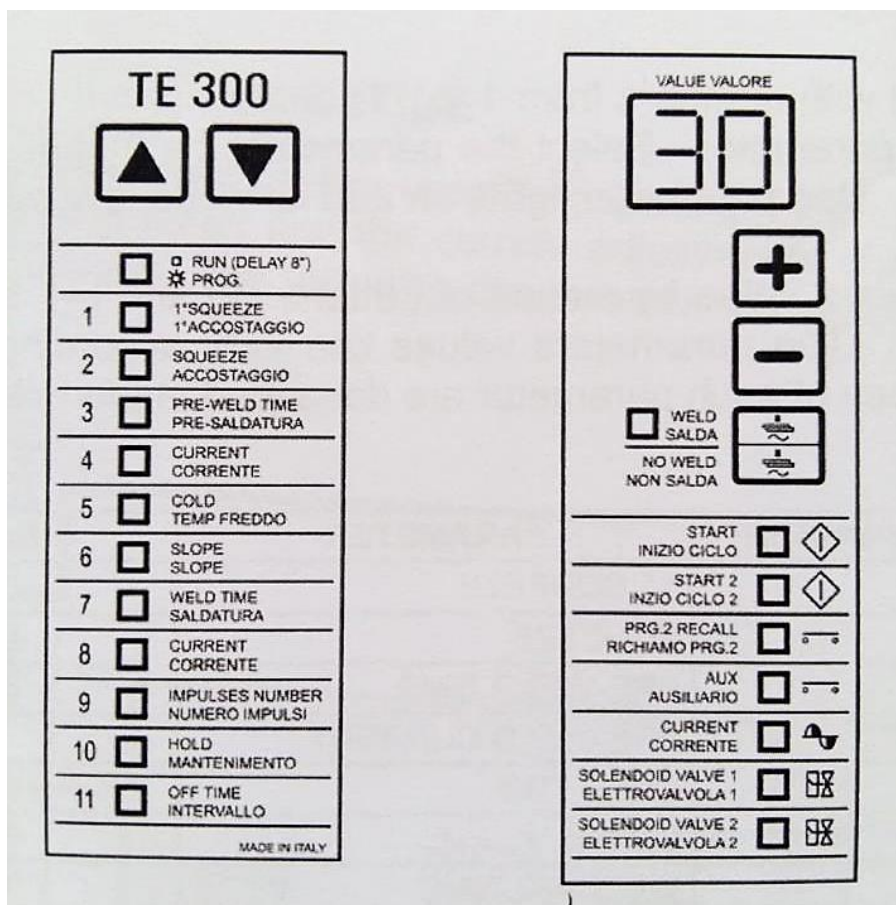
Debljina materijala [mm]	0,5	0,8	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
Potreban promjer [mm]	4	4,5	5	6	7	7,5	8,5	9,5	11

3.2.2. Upravljačka jedinica uređaja

U pištolj 3301 za elektrootporno zavarivanje ugrađena je posebna upravljačka jedinica TE300. To je mikroprocesorska upravljačka jedinica za pištolje za elektrootporno točkasto zavarivanje (prikazano Slikom 20). Ova upravljačka jedinica uključuje specifične funkcije koje se koriste pri radu s pištoljem elektrootpornog točkastog zavarivanja, kao što su kontrola dvostrukog udara i funkcija koja provjerava djelotvornost sigurnosnih uređaja koji se mogu eventualno ugraditi na ručku stroja. Moguće je programirati dva različita programa zavarivanja koje je moguće opozvati vanjskim uređajem. Svaki program sastoji se od jedanaest programibilnih parametara koji opisuju radni ciklus (Slika 18). Osim jednostavnog programa od četiri parametara s kratkim udarom, upravljačka jedinica može izvršiti i postupak zavarivanja uz korištenje predzavarne struje, linearni porast struje i/ili veći broj okidanja odjednom. Još jedna dodatna funkcija ove upravljačke jedinice je kompenzacija minimalne struje.



Slika 17. Prikaz upravljačke jedinice TE300 za pištolje elektrootpornog točkastog zavarivanja



Slika 18. Shematski prikaz upravljačke jedinice TE300 [18]

Neke od glavnih značajki za ovu upravljačku jedinicu su:

- pojednostavljeno programiranje pomoću pet tipki
- sinkroni tiristora upravljaju regulacijom faznog pomaka uređaja za podešavanje struje zavarivanja
- pojedinačni i automatski ciklus
- automatski dvostruki hod
- kompenzacija sekundarne struje za zavarivanje oksidiranih listova i štapova
- *WELD / NO WELD* funkcija
- odgoda prilagodbe prvog faznog pomaka za postizanje što bolje ravnoteže apsorpcije stroja od napajanja
- samopodešavanje frekvencijske mreže 50/60 Hz.

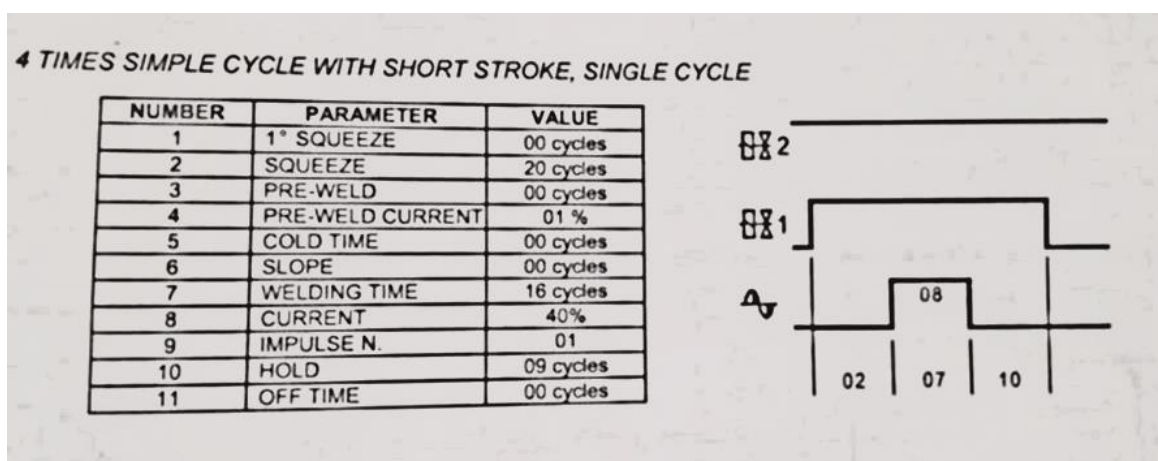
Parametri su označeni rednim brojevima od 1 do 11 i popisani su na lijevoj strani kontrolne jedinice. Parametri se odabiru pomoću tipka ▼ i ▲. LED svjetiljka se pali kod parametra koji je odabran, a njegova se vrijednost prikazuje na zaslonu.

Parametri zavarivanja mijenjaju se tipkama + i –, povećavajući ili smanjujući vrijednost koja je prikazana na zaslonu upravljačke jedinice. Vrijednosti parametara mogu se mijenjati ovisno o vrsti parametra, a minimalne i maksimalne vrijednosti za pojedini parametar upravljačke jedinice TE300 prikazane su Tablicom 9.

Tablica 9. Minimalne i maksimalne vrijednosti pojedinih parametara upravljačke jedinice TE300

BROJ PARAMETRA	PARAMETAR	RASPON VRIJEDNOSTI
1	1° stisak	00 – 99 perioda
2	Stisak	1 – 99 perioda
3	Vrijeme prije zavarivanja	00 – 60 perioda
4	Predzavarna struja	1 – 99 %
5	Vrijeme hlađenja	00 – 50 perioda
6	Linearni porast struje	00 – 29 perioda
7	Vrijeme zavarivanja	1 – 60 perioda
8	Struja zavarivanja	1 – 99 %
9	Broj udara	1 – 9
10	Vrijeme zadržavanja sile pritiska	1 – 99 perioda
11	Vrijeme prekida	00 – 99 perioda

Sljedećom slikom (Slika 19) prikazan je primjer najjednostavnijeg programa s kratkim udarom. Lijevo na slici vidljiva je tablica, jednaka kao i Tablica 7, s postavljenim vrijednostima parametara, dok je s desne strane prikazan dijagram redoslijeda zadanih parametara. Ovaj program će se koristiti i za izvedbu eksperimenta, samo s drugačijim vrijednostima parametara.



Slika 19. Prikaz najjednostavnijeg programa upravljačke jedinice s tablicom zadanih parametara i njihovim dijagramom [18]

3.3. Tijek eksperimenta

U nastavku slijedi detaljan opis svakog koraka tijekom ovog eksperimenta. Važno je naglasiti da postoje dvije vrste režima elektrootpornog zavarivanja (meki i oštri režim), a ovaj je eksperiment proveden mekim režimom. Neke značajke mekog režima su veliki toplinski gubici, velike deformacije i duboki otisak elektrode.

3.3.1. Ispitni uzorci

Tvrtka Ferokotao d. d. unaprijed je pripremila uzorke. Uzeti su limovi debljine koje se najviše traže na njihovom tržištu, a to su 1,0 mm, 1,2 mm i 1,5 mm. Lim debljine 1,0 mm u eksperimentu je označen sa „A“, lim debljine 1,2 mm je označen sa „B“ i lim debljine 1,5 mm nosi oznaku „C“. Kao što je u prethodnom poglavlju spomenuto, epruvete su narezane na kvadrate dimenzije 980 mm, a površina je očišćena alkoholom.

3.3.2. Određivanje parametara zavarivanja

Prije početka zavarivanja pištoljem odredili su se i podesili parametri na uređaju. Jakost struje zavarivanja (I_z) je parametar koji smo odabrali mijenjati u ovom eksperimentu.

Za početak, Tablicom 10 prikazani su početni parametri za svaku debljinu lima, odnosno parametri kojima se dobiva dobar zavareni spoj i koje tvrtka koristi za svakodnevnu proizvodnju.

Tablica 10. Prikaz vrijednosti početnih parametara za svaki pojedini lim

BROJ PARAMETRA	PARAMETAR	„A“ (1,0 mm)	„B“ (1,2 mm)	„C“ (1,5 mm)
1	1° stisak	0	0	0
2	Stisak	25	25	30
3	Vrijeme prije zavarivanja	0	0	0
4	Predzavarna struja	1	1	1
5	Vrijeme hlađenja	0	0	0
6	Linearni porast struje	0	0	0
7	Vrijeme zavarivanja	18	20	24
8	Struja zavarivanja	65	68	78
9	Broj udara	1	1	1
10	Vrijeme zadržavanja sile pritiska	9	10	12
11	Vrijeme prekida	0	0	0

S obzirom na to da se radi o trima različitim debljinama, svaka debljina ima svoju početnu struju zavarivanja kojom se dobiva dobar zavareni spoj. Tako je za lim „A“ početna

struja 7,475 kA (65 % od maksimalne struje pištolja), za lim „B“ iznosi 7,82 kA ili 68 %, a za lim „C“ 8,97 kA ili 78 %.

Osim početnih struja zavarivanja, za eksperiment su se koristile dodatne dvije jakosti struje, manja struja od početne za 5 % i veća struja zavarivanja od početne za 5 %. Tako je za svaku struju dani indeks kraj oznake lima. Manja od početne struje nosi indeks 1, početna struja je označena sa 2 i veća od početne struje nosi indeks 3.

Također, sila pritiska za svaku debljinu lima je drugačija u cilju dobivanja što kvalitetnijeg zavara. Za lim „A“ sila pritiska iznosi 160 N, za lim „B“ iznosi 200 N i za lim „C“ iznosi 240 N. Ovi parametri tijekom cijelog eksperimenta ostaju nepromijenjeni.

3.3.3. Parametar struje zavarivanja za svaki uzorak

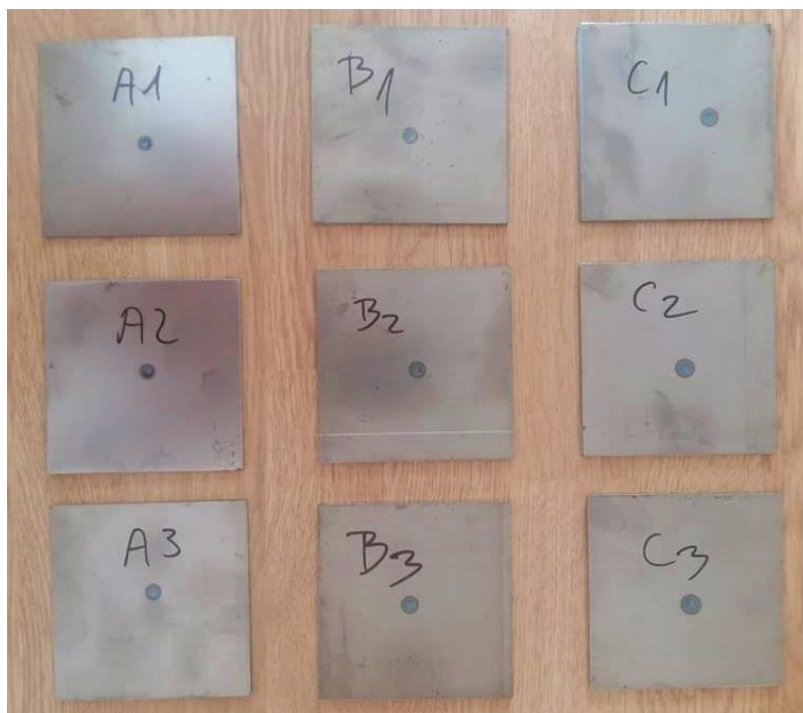
Eksperiment je proveden na devet ispitnih uzoraka, odnosno osamnaest limova. U Tablici 11 prikazane su vrijednosti struje zavarivanja za svaki uzorak. Svi su drugi parametri ostali na početnim vrijednostima i nepromijenjeni tijekom cijelog eksperimenta.

Tablica 11. Vrijednosti struje zavarivanja u eksperimentu

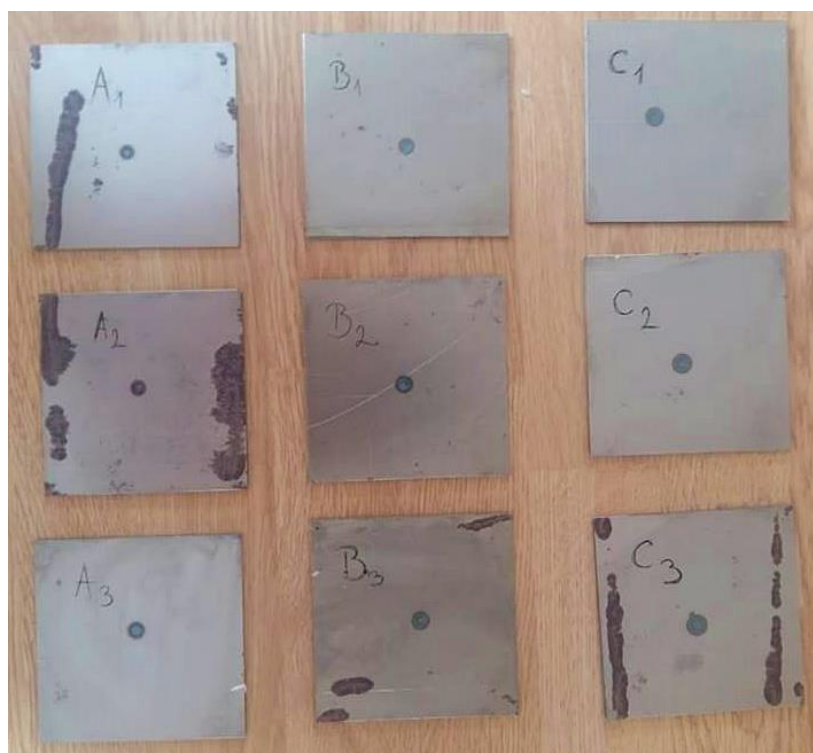
Debljina uzorka [mm]	Oznaka uzorka	Jakost struje (I_z)	
		kA	%
1,0	A1	6,9	60
	A2	7,475	65
	A3	8,05	70
1,2	B1	7,245	63
	B2	7,82	68
	B3	8,395	73
1,5	C1	8,395	73
	C2	8,97	78
	C3	9,545	83

3.3.4. Izgled zavarenih uzoraka

Slikama 20 i 21 prikazani su zavareni limovi. Slika 20 prikazuje gornju (prednju) stranu točke zavora u dodiru radnog komada i nepomične elektrode, dok Slika 21 prikazuje zavarenu točku u dodiru radnog komada i pomične elektrode.



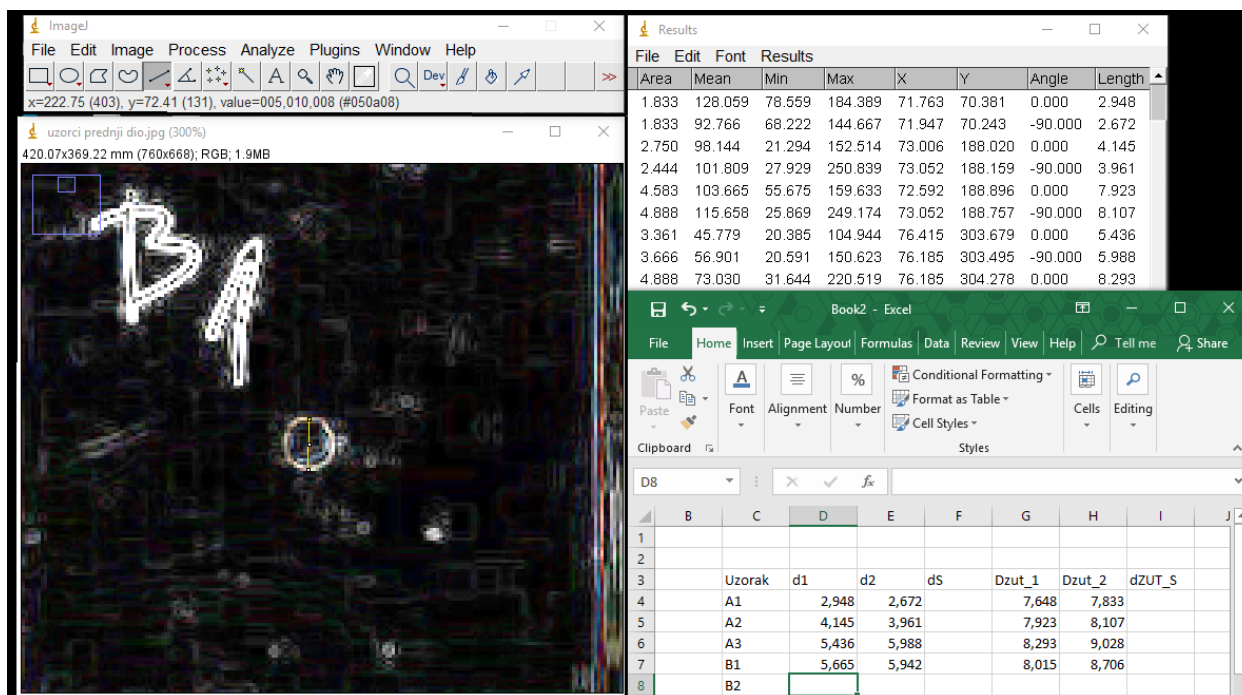
Slika 20. Prednja strana zavarenog spoja (kontakt: radni komad - nepomična elektroda)



Slika 21. Zadnja strana zavarenog spoja (kontakt: radni komad - pomična elektroda)

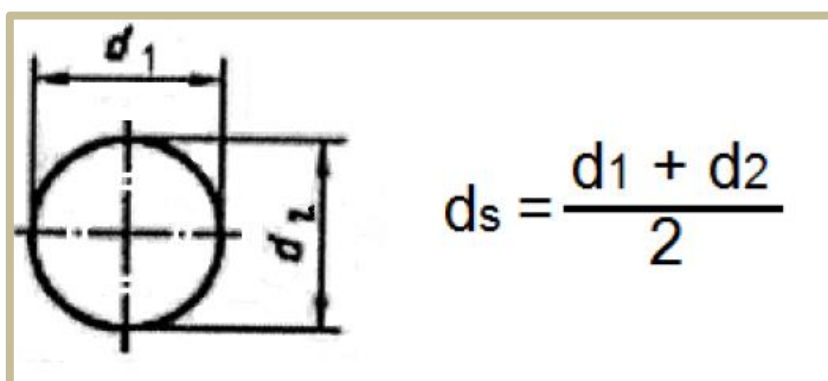
3.4. Vizualna analiza uzoraka

Vizualna analiza uzoraka izvršena je preko računalnog programa *ImageJ* gdje su točno izmjereni promjeri točaka zavora, kao i promjeri zone utjecaja topline. Na Slici 22 može se vidjeti kako izgleda mjerenje jednog od uzorka u programu *ImageJ* i zapisivanje podataka u *MS Excel*.



Slika 22. Prikaz mjerenja jednog uzorka pomoću računalnog programa *ImageJ*

Način mjerenja promjera zavarenih točaka na svakom od uzorka, kao i promjeri zone utjecaja topline prikazani su Slikom 23 s kvalitativnim kotama. Aritmetička sredina ili srednja vrijednost dobiva se zbrajanjem dvaju promjera i dijeljenjem s dva. Oznaka aritmetičke sredine za promjer zavarene točke je d_s , dok je za promjer zone utjecaja topline d_{ZUT_S} . Vrijednosti za svaki uzorak prikazane su Tablicom 12.

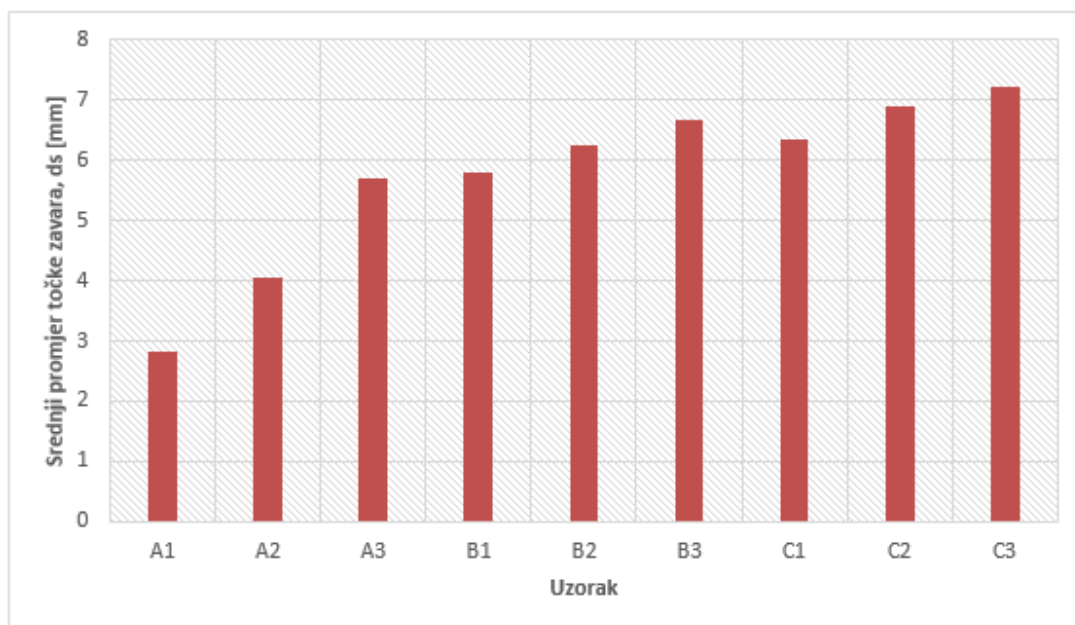


Slika 23. Postupak dobivanja srednje vrijednosti promjera [7]

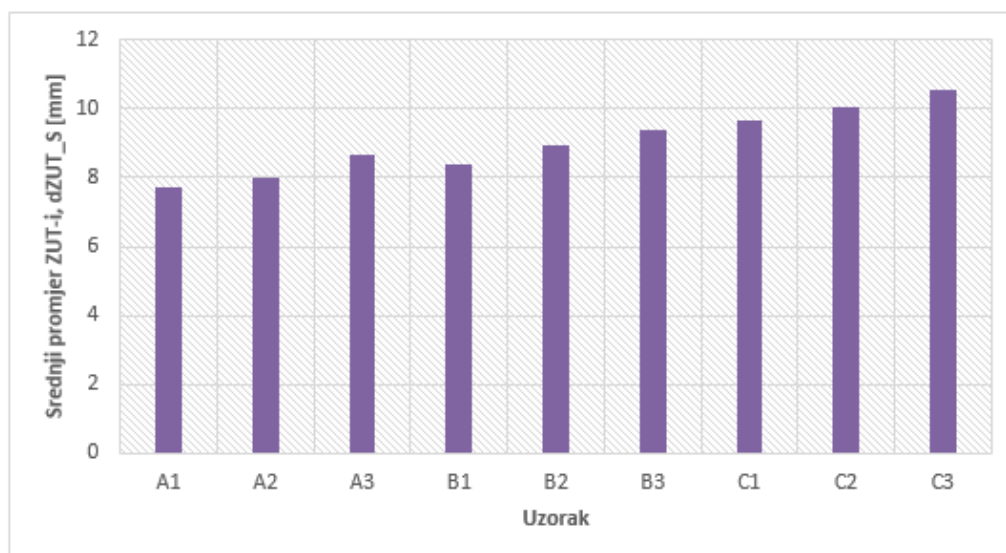
Tablica 12. Promjeri točke zavora, zone utjecaja topline i njihove aritmetičke vrijednosti

Uzorak	d ₁ [mm]	d ₂ [mm]	d _s [mm]	dz _{UT_1} [mm]	dz _{UT_2} [mm]	dz _{UT_S} [mm]
A ₁	2,948	2,672	2,810	7,648	7,833	7,741
A ₂	4,145	3,961	4,053	7,923	8,107	8,015
A ₃	5,436	5,988	5,712	8,293	9,028	8,661
B ₁	5,665	5,942	5,804	8,015	8,706	8,361
B ₂	6,633	5,873	6,253	9,258	8,567	8,913
B ₃	6,425	6,909	6,667	9,466	9,328	9,397
C ₁	5,897	6,817	6,357	9,350	9,949	9,650
C ₂	6,587	7,186	6,887	10,087	9,995	10,041
C ₃	7,393	7,048	7,221	10,847	10,226	10,537

Analiziranjem podataka iz Tablice 11 u kojoj su navedene različite vrijednosti struje zavarivanja za svaki pojedini uzorak i Tablice 12 u kojoj su vidljivi promjeri zavora primjećuje se da jakost struje zavarivanja ima veći utjecaj na veličinu točke zavora, nego na utjecaj zone topline, što je preciznije vidljivo na Dijagramima 1 i 2.

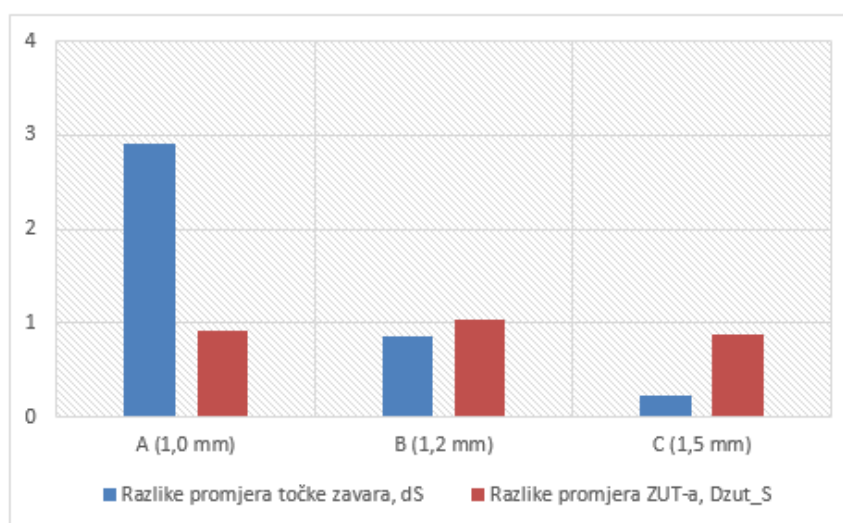


Dijagram 1. Prikaz srednjeg promjera točke zavora



Dijagram 2. Prikaz srednjih promjera zone utjecaja topline

Dalje je preciznije razmotren odnos između najveće i najmanje struje za svaki uzorak, odnosno razlike promjera točke zavora u slučaju djelovanja najveće i najmanje struje određene za svaku debljinu lima. Jednako razmatranje napravljeno je i za promjere zone utjecaja topline. Dijagramom 3 vidljivi su spomenuti odnosi promjera za sve debljine uzoraka. Uočava se značajan pad razlike promjera točke zavora s porastom debljine uzorka, dok kod ZUT-a nema značajnijih promjena. U slučaju da se radio eksperiment i na limu debljine 2,0 mm, vrlo vjerojatno bi te promjene iznosile samo desetinku milimetra. Pretpostavlja se da na zonu utjecaja topline ima veći utjecaj vrijeme zavarivanja od struje zavarivanja, s obzirom na to da je taj parametar tijekom cijelog eksperimenta bio nepromijenjen, a razlike promjera su izuzetno male između uzoraka.



Dijagram 3. Razlike promjera dS i dZUT_S djelovanjem najveće i najmanje struje

4. ZAKLJUČAK

Zavarivanje je najrašireniji i najčešći način spajanja materijala u današnjici. Razvijanjem tehnologije i porastom modernizacije dolazi se do brzih i učinkovitih rješenja na svim područjima, pa tako i na području strojarstva, odnosno zavarivanja. Kod zavarivanja je od nekad bio cilj sklopiti što veći broj konstrukcija u što kraćem vremenskom periodu, a da taj proces poprati odgovarajući nivo kvalitete zavora. Elektrootporno zavarivanje je jedan od najbolje automatiziranih i robotiziranih postupaka te je vrlo pogodno za masovnu proizvodnju zbog čega ima opravdani naziv ekonomičnog, učinkovitog i brzog zavarivanja. Elektrootporno točkasto zavarivanje se prvenstveno koristi u automobilske, zrakoplovne i tračničke industriji, kao i u vojnoj industriji, građevini i proizvodnji različitih metalnih konstrukcija.

Elektrootporno točkasto zavarivanje je specifično po dobivanju zavora preko električnog otpora koji nastaje prolaskom struje kroz radni materijal zavarivanja te zagrijavanjem materijala u točki zavora. Prolaskom struje u preklopnom komadu zagrijava se materijal te se pritiskom elektroda određenom silom dobiva zavareni spoj. Na kvalitetu zavarenog spoja najveći utjecaj imaju tri osnovna parametra: struja zavarivanja, vrijeme zavarivanja i sila pritiska elektroda. Ovi se parametri moraju izuzetno precizno kvantificirati za dobivanje kvalitetnog zavarenog spoja, a svaka i najmanja promjena jednog od ovih parametara utječe na geometriju zavarene točke, pa tako i na mehanička svojstva zavarenog spoja.

U praktičnom dijelu rada promatrao se utjecaj promjene struje zavarivanja na zavareni spoj i na njegov geometrijski oblik. Uz struju zavarivanja povezana je i zona utjecaja topline, te su se razmotrila i usporedila ta dva čimbenika na zavareni spoj. Zaključuje se da na tanji radni materijal i mala promjena struje zavarivanja značajnije utječe na izgled i geometrijski oblik zavarenog spoja, nego u slučaju debljeg radnog materijala. Na zonu utjecaja topline struja zavarivanja ne donosi značajnije promjene u izgledu zavora, već se pretpostavlja da na nju više djeluje vrijeme zavarivanja.

S obzirom na to da je ostala pretpostavka oko utjecaja na ZUT zavarenog spoja, u daljnjem se eksperimentu može ustanoviti je li pretpostavka točna promjenom parametra vremena zavarivanja. Također se može izvršiti makroispitivanje te se može usporediti utjecaj struje zavarivanja i vrijeme zavarivanja na izdržljivost zavarenog spoja.

5. LITERATURA

- [1] RAM Rijeka, Proizvodnja i trgovina opremom i alatima za rezanje i zavarivanje, Osnovni postupci zavarivanja: <http://www.ram-rijeka.com/Repository/Dokumenti/Osnovni-postupci-zavarivanja.pdf>, (19. 2. 2018.)
- [2] Samardžić, Ivan i dr. *Analiza tehnološkičnosti zavarenih konstrukcija*: [digitalni udžbenik] 2001. URL: <http://www.sfsb.unios.hr/kth/zavar/>
- [3] Oletić, Mario: *Razvoj upravljačkog uređaja za elektrootporno točkasto zavarivanje*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb: <http://repozitorij.fsb.hr/7741/1/Oleti%C4%87%20Diplomski%202017.pdf> (19. 2. 2018.)
- [4] Miller, Handbook for Resistance Spot Welding: <https://www.millerwelds.com/resources/welding-resources> (22. 2. 2018.)
- [5] Radaković, Zoran J.: *Elektrootporno zavarivanje*, Mašinski fakultet, Beograd: <http://afrodita.rcub.bg.ac.rs/~rzoran/ZAVAELOTP.pdf> (22. 2. 2018.)
- [6] Hrvatska enciklopedija <http://enciklopedija.hr/> (22. 2. 2018.)
- [7] Hlevnjak, Alen: *Točkasto elektrootporno zavarivanje visoko nehrđajućih čelika*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb: <http://repozitorij.fsb.hr/4737/> (22. 2. 2018.)
- [8] Filetin, T., Franz M. i dr.(2012.): *Svojstva i karakteristike materijala*, Tehnička knjiga, Zagreb
- [9] Panić, Goran: *Elektrootporni postupci zavarivanja*, Strojarski fakultet, Slavonski Brod: <https://repozitorij.sfsb.hr/islandora/object/sfsb:50> (26. 2. 2018.)
- [10] Kraut, B. (2009.): *Strojarski priručnik*, Tehnička knjiga, Zagreb
- [11] NPTEL, Resistance welding: <http://nptel.ac.in/courses/112107144/welding/lecture11&12.htm> (26. 2. 2018.)
- [12] Doc.dr.sc. I. Garašić: *Prezentacija elektrootporno zavarivanje*; ZiM, PS, PZ: https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1416340010-0-elektrootporno-zavarivanje.pdf
- [13] Raut, Manoj: *Optimization of spot welding process parameters for maximum tensile strength*, IJMERR: <http://www.ijmerr.com/uploadfile/2015/0409/20150409043714398.pdf> (27. 2. 2018.)
- [14] Robot welding: Spot Welding Parameters: http://www.robot-welding.com/Welding_parameters.htm (3. 3. 2018.)
- [15] Spotwelding Consultants Inc.: <http://www.spotweldingconsultants.com/unitrol-softtouch.html> (5. 3. 2018.)

- [16] Resistance weld: <http://weldguru.com/resistance-weld/> (9. 3. 2018.)
- [17] Resistance Spot Welding Gun: https://www.photonics.com/a55762/Resistance_Spot-Welding_Gun_Meets_Fiber_Laser (6. 7. 2018.)
- [18] Tecna:
https://www.tecna.net/index.php?option=com_content&view=featured&Itemid=57&language=en (6. 7. 2018.)

6. PRILOZI

Prilog 1: CD-R disc